

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**TEKİL KAZIKLARA ALTERNATİF OLARAK KULLANILAN ÇOKLU
KAZIK GRUPLARININ ZEMİN VE MALZEME PARAMETRESİNE
BAĞLI OLARAK SEÇİMİ VE MALİYET ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mehmet Yusuf ERBİŞİM

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Programı

ŞUBAT 2026

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**TEKİL KAZIKLARA ALTERNATİF OLARAK KULLANILAN ÇOKLU
KAZIK GRUPLARININ ZEMİN VE MALZEME PARAMETRESİNE
BAĞLI OLARAK SEÇİMİ VE MALİYET ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Mehmet Yusuf ERBİŞİM
(501211322)**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Ümit KARADOĞAN

ŞUBAT 2026

ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY ★ GRADUATE SCHOOL

**SINGLE PILES AND THEIR MULTI-PILE GROUP ALTERNATIVES
SELECTION BASED ON SOIL AND MATERIAL
PARAMETERS AND COST ANALYSIS**

M.Sc. THESIS

**Mehmet Yusuf ERBİŞİM
(501211322)**

Department of Civil Engineering

Soil Mechanics and Geotechnical Engineering Programme

Thesis Advisor: Assis. Prof. Dr. Ümit KARADOĞAN

FEBRUARY 2026

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 501211322 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Mehmet Yusuf ERBİŞİM, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “TEKİL KAZIKLARA ALTERNATİF OLARAK KULLANILAN ÇOKLU KAZIK GRUPLARININ ZEMİN VE MALZEME PARAMETRESİNE BAĞLI OLARAK SEÇİMİ VE MALİYET ANALİZİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Dr. Öğr. Üyesi Ümit KARADOĞAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Berrak TEYMÜR**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Oral YAĞCI
Aydın Adnan Menderes Üniversitesi

.....

Teslim Tarihi : **3 Şubat 2026**
Savunma Tarihi : **20 Şubat 2026**





Anneanneme,



ÖNSÖZ

Bu tez çalışması, farklı zemin tiplerinde kazıklı iskele sistemlerinde tekil kazıklara alternatif olarak kullanılan çoklu kazık gruplarının seçim kriterlerini ve maliyet etkilerini incelemek amacıyla hazırlanmıştır. Çalışma kapsamında, zemin ve malzeme parametrelerindeki değişimin taşıma gücü gereksinimleri üzerindeki yansımaları değerlendirilmiş; buna bağlı olarak boyutlandırma ve maliyet analizi karşılaştırmalı bir çerçevede ele alınmıştır. Böylece, mühendislik karar sürecinde hem güvenlik koşullarını hem de ekonomik uygulanabilirliği birlikte gözeten bir yaklaşım sunulması hedeflenmiştir.

Tez sürecinin planlanması, yürütülmesi ve yazım aşamalarında bilgi ve deneyimleriyle yol gösteren tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Ümit KARADOĞAN'a teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, katkıları ve yardımlarından dolayı Prof. Dr. Oral YAĞCI'ya ve Doç. Dr. Murat AKSEL'e teşekkür ederim.

Tez boyunca sağlanan destek ve katkılar, çalışmanın daha sistematik ve tutarlı biçimde ilerlemesine yardımcı olmuştur. Bu süreçte görüş, öneri ve emeği bulunan herkese teşekkür ederim.

Şubat 2026

Mehmet Yusuf ERBİŞİM

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖNSÖZ	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SEMBOLLER	xv
ÇİZELGE LİSTESİ	xvii
ŞEKİL LİSTESİ	xix
ÖZET	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	1
1.2 Tezin Kapsamı	2
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	5
2.1 Kıyı Yapıları, Derin Temeller ve Kazıklı İskele Sistemleri	5
2.1.1 Kıyı yapıları ve kazıklı iskele sistemleri	5
2.1.2 Derin temel sistemleri ve kazık temeller	6
2.2 Kazıkların Sınıflandırılması	8
2.2.1 Malzemeye göre kazıklar	8
2.2.2 İmalat - uygulama yöntemine göre kazıklar	9
2.2.3 Yük aktarım mekanizmasına göre kazıklar	10
2.2.4 Zemin iyileştirme amaçlı kompaksiyon kazıkları	10
2.3 Kazıklarda Düşey Taşıma Gücü	10
2.4 Kohezyonlu Zeminlerde Kazık Taşıma Gücü	11
2.5 Kohezyonsuz Zeminlerde Kazık Taşıma Gücü	11
2.6 Kazık Grupları ve Kazıklı İskele Sistemlerinin Davranışı	12
2.6.1 Kazıklı iskele sistemlerinde zemin yapı etkileşimi ve yatay yükler	13
2.7 Tekil Kazıklara Alternatif Olarak Çoklu Kazık Grubunun Kullanılması ve Maliyet Analizi	14
3. YÖNTEM VE ANALİTİK ÇERÇEVE	19
3.1 Referans Kazıklı İskele Sistemi	19
3.2 Referans Senaryo (Senaryo - 0) İçin Taşıma Gücü Hesaplamaları	20
3.3 Senaryo 1: Gevşek Kumda 0,10 m (4") Çaplı Grup Kazık Düzeni	26
3.3.1 Tekil 0,10 m (4") kazık için taşıma gücü ifadesi	28
3.3.2 Mikro grup verim katsayısı ve eşdeğerlik şartı	29
3.3.3 Gerekli gömülme boyunun belirlenmesi (Senaryo 1)	32
3.4 Senaryo 2: Orta Sıkı Kumda 0,40 m (16") Çaplı Tekil Kazık Düzeni	33
3.4.1 Gerekli gömülme boyunun belirlenmesi (Senaryo 2)	33
3.5 Senaryo 3: Orta Sıkı Kumda 0,10 m (4") Çaplı Grup Kazık Düzeni	34
3.5.1 Gerekli gömülme boyunun belirlenmesi (Senaryo 3)	35
3.6 Senaryo 4: Sıkı Kumda 0,40 m (16") Çaplı Tekil Kazık Düzeni	36
3.6.1 Gerekli gömülme boyunun belirlenmesi (Senaryo 4)	36
3.7 Senaryo 5: Sıkı Kumda 0,10 m (4") Çaplı Grup Kazık Düzeni	38
3.7.1 Gerekli gömülme boyunun belirlenmesi (Senaryo 5)	38
3.8 Senaryo 6: Gevşek Kumda 0,40 m (16") Çaplı Ahşap Tekil Kazık Düzeni	39
3.8.1 Gerekli gömülme boyunun belirlenmesi (Senaryo 6)	39
3.9 Senaryo 7: Gevşek Kumda 0,10 m (4") Çaplı Ahşap Grup Kazık Düzeni	40
3.9.1 Gerekli gömülme boyunun belirlenmesi (Senaryo 7)	40
3.10 Senaryo 8: Orta Sıkı Kumda 0,40 m (16") Çaplı Ahşap Tekil Kazık Düzeni	41
3.10.1 Gerekli gömülme boyunun belirlenmesi (Senaryo 8)	41

3.11 Senaryo 9: Orta Sıkı Kumda 0,10 m (4") Çaplı Ahşap Grup Kazık Düzeni	42
3.11.1 Gerekli gömülme boyunun belirlenmesi (Senaryo 9)	42
3.12 Senaryo 10: Sıkı Kumda 0,40 m (16") Çaplı Ahşap Tekil Kazık Düzeni ..	43
3.12.1 Gerekli gömülme boyunun belirlenmesi (Senaryo 10)	43
3.13 Senaryo 11: Sıkı Kumda 0,10 m (4") Çaplı Ahşap Grup Kazık Düzeni	44
3.13.1 Gerekli gömülme boyunun belirlenmesi (Senaryo 11)	44
3.14 Senaryoların Özeti ve Karşılaştırılması	45
4. MALİYET ANALİZİ VE SENARYO KARŞILAŞTIRMASI	47
4.1 Maliyet Hesabı Yaklaşımı ve Kullanılan Kabuller	47
4.2 Senaryo 0: Gevşek Kumda 0,40 m (16") Çelik Tekil Kazık Grubu	49
4.3 Senaryo 1: Gevşek Kumda 0,10 m (4") Çelik Mikro-Grup Kazık Düzeni .	50
4.3.1 İmalat, çakma ve toplam maliyet (normal çakım)	51
4.3.2 Alternatif: beraber çakım varsayımı (7 mikro kazık aynı anda)	52
4.4 Senaryo 2: Orta Sıkı Kumda 0,40 m (16") Çelik Tekil Kazık Grubu	52
4.5 Senaryo 3: Orta Sıkı Kumda 0,10 m (4") Çelik Mikro-Grup Kazık Düzeni	54
4.5.1 İmalat, çakma ve toplam maliyet (normal çakım)	55
4.5.2 Alternatif: beraber çakım varsayımı (7 mikro kazık aynı anda)	55
4.6 Senaryo 4: Sıkı Kumda 0,40 m (16") Çelik Tekil Kazık Grubu	56
4.7 Senaryo 5: Sıkı Kumda 0,10 m (4") Çelik Mikro-Grup Kazık Düzeni	57
4.7.1 İmalat, çakma ve toplam maliyet (normal çakım)	58
4.7.2 Alternatif: beraber çakım varsayımı (7 mikro kazık aynı anda)	59
4.8 Senaryo 6: Gevşek Kumda 0,40 m (16") Çaplı Ahşap Tekil Kazık Düzeni – Maliyet Hesabı	59
4.9 Senaryo 7: Gevşek Kumda 0,10 m (4") Çaplı Ahşap Mikro-Grup Kazık Düzeni – Maliyet Hesabı	61
4.9.1 Hazırlık ve çakma maliyeti (normal çakım)	62
4.9.2 Alternatif: beraber çakım varsayımı (7 mikro kazık aynı anda)	63
4.10 Senaryo 8: Orta Sıkı Kumda 0,40 m (16") Çaplı Ahşap Tekil Kazık Grubu – Maliyet Hesabı	64
4.11 Senaryo 9: Orta Sıkı Kumda 0,10 m (4") Çaplı Ahşap Mikro-Grup Kazık Düzeni – Maliyet Hesabı	66
4.11.1 Normal çakım (84 kazık ayrı ayrı)	67
4.11.2 Alternatif: beraber çakım varsayımı (7 mikro kazık aynı anda)	68
4.12 Senaryo 10: Sıkı Kumda 0,40 m (16") Çaplı Ahşap Tekil Kazık Grubu – Maliyet Hesabı	69
4.13 Senaryo 11: Sıkı Kumda 0,10 m (4") Çaplı Ahşap Mikro-Grup Kazık Düzeni – Maliyet Hesabı	70
4.13.1 Normal çakım (84 kazık ayrı ayrı)	71
4.13.2 Alternatif: beraber çakım varsayımı (7 mikro kazık aynı anda)	72
5. SENARYO KARŞILAŞTIRMASI VE DEĞERLENDİRME	73
5.1 Maliyet Analizi Özeti	73
5.2 Normal Çakım Sonuçlarının Değerlendirilmesi	74
5.3 Beraber Çakım Varsayımının Etkisi ve Birim Fiyat Seçimi	74
5.4 Maliyet Analizi Yorumlaması	77
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	81
KAYNAKLAR	87
ÖZGEÇMİŞ	91

KISALTMALAR

ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
ASCE	: American Society of Civil Engineers
AYGM	: Altyapı Yatırımları Genel Müdürlüğü
CEM	: Coastal Engineering Manual
COPRI	: Coasts, Oceans, Ports, and Rivers Institute
ÇŞİDB	: Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı
DNV	: Det Norske Veritas
T.C.	: Türkiye Cumhuriyeti
TL	: Türk Lirası
USACE	: United States Army Corps of Engineers



SEMBOLLER

D	: Kazık çapı
d	: Kazık eksenleri arası uzaklık
f_s	: Birim çevre sürtünmesi
$f_{s,i}$	: i tabakasındaki birim çevre sürtünmesi
FS	: Güvenlik katsayısı
K_0	: Yerinde yatay gerilme katsayısı
L	: Kazık boyu / gömülü boy
n	: Kazık adedi
N_c	: Taşıma gücü katsayısı (kil için)
N_q	: Taşıma gücü katsayısı (kum için)
N_γ	: Taşıma gücü katsayısı (kum için)
p_0	: Kazık ucu seviyesindeki efektif düşey gerilme
Q_u	: Nihai düşey taşıma gücü
Q_{all}	: İzin verilebilir düşey taşıma gücü
Q_p	: Uç direnç
Q_s	: Çevre sürtünme direnci
q_d	: Nihai birim uç direnci
t	: Boru kazık et kalınlığı
u	: Kazık çevre uzunluğu
η	: Grup verim katsayısı
δ	: Zemin-kazık arayüz sürtünme açısı
ϕ'	: Efektif içsel sürtünme açısı
γ	: Birim hacim ağırlık
γ'	: Efektif birim hacim ağırlık
σ_{v0}	: Toplam düşey gerilme
σ'_{v0}	: Efektif düşey gerilme



ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1: Kazık malzemesine bağlı δ ve K değerleri (Kumbasar & Kip, 1999).	22
Çizelge 3.2: Zeminin relatif sıkılığına bağlı önerilen K tan δ aralıkları (Kumbasar & Kip, 1999).....	22
Çizelge 3.3: Sürtünme kazıkları için grup verim katsayısı bağıntıları (Das, 2010, Tablo 11.17).	29
Çizelge 3.4: Senaryo 0–11 için hesaplanan gömülme boyu değerlerinin özeti. ...	45
Çizelge 4.1: S0 için maliyet hesabı özeti	50
Çizelge 4.2: S1 için maliyet hesabı özeti	52
Çizelge 4.3: Senaryo 2 için maliyet hesabı özeti.	54
Çizelge 4.4: Senaryo 3 için maliyet hesabı özeti.	56
Çizelge 4.5: Senaryo 4 için maliyet hesabı özeti.	57
Çizelge 4.6: Senaryo 5 için maliyet hesabı özeti.	59
Çizelge 4.7: Senaryo 6 için maliyet hesabı özeti.	61
Çizelge 4.8: Şahmerdan ile ahşap kazık çakılmasına ilişkin birim fiyatlar.....	63
Çizelge 4.9: Senaryo 7 için maliyet hesabı özeti.	64
Çizelge 4.10: Senaryo 8 için maliyet hesabı özeti.	66
Çizelge 4.11: Senaryo 9 için maliyet hesabı özeti.	68
Çizelge 4.12: Senaryo 10 için maliyet hesabı özeti.....	70
Çizelge 4.13: Senaryo 11 için maliyet hesabı özeti.....	72
Çizelge 5.1: S0–S11 için toplam maliyetlerin toplu özeti.....	73
Çizelge 5.2: C_{top}^* değerine göre en düşük maliyetli senaryoların sıralaması.	74
Çizelge 5.3: Mikro grup senaryolarında beraber çakım varsayımının toplam maliyete etkisi.....	76
Çizelge 5.4: Ahşap mikro grup senaryolarında maliyet bileşenlerinin toplam içindeki payı.....	76
Çizelge 6.1: Maliyet düşürmeye yönelik uygulanabilir önerilerin özeti.	82
Çizelge 6.2: Mikro grup senaryolarında beraber çakım varsayımının toplam maliyete etkisi.....	82
Çizelge 6.3: Normal çakım ve beraber çakım perspektiflerinde öne çıkan senaryoların toplam maliyet özeti.....	85



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1:	Kazık temellerin kullanımını gerektiren tipik zemin ve yükleme koşulları: (a) derindeki sağlam kaya tabakasına yük aktarımı, (b) sürtünme ve yukarı yöndeki yükler, (c) yüksek yatay yükler altında çalışan sistemler, (d) yüzeye yakın şişen zeminlerin bulunduğu profiller, (e) kalın sıkışabilir tabakalar nedeniyle aşırı oturma riski, (f) oyulma ve erozyon etkisi altındaki temeller (Das, 2010).	7
Şekil 2.2:	Tekil silindir ve eşdeğer katı hacme sahip sonlu silindir dizisinin oyulma–birikim desenlerinin karşılaştırılması: (a) 9 cm çaplı referans silindir, (b) düzenli yerleşimli altıgen silindir dizisi ($D=24$ cm, $\phi = 0.14$). Yatay uzaklıklar ve renk ölçeği mm cinsindedir (Yağcı, Yıldırım, Çelik, Kitsikoudis, Duran, & Kırca, 2017).	17
Şekil 3.1:	Referans senaryonun plan görünüşü	20
Şekil 3.2:	Referans senaryoda kazıkların kesit görünüşü	21
Şekil 3.3:	Senaryo 1 için 0,10 m (4") çaplı grup kazıklardan oluşan kazık grubunun plan görünüşü.....	27
Şekil 3.4:	Senaryo 1 için 0,40 m (16") dairesi içinde düzenlenmiş 7 adet 0,10 m (4") çaplı çelik kazıktan oluşan mikro grup yerleşimi	28
Şekil 3.5:	Kum zeminde kazık grubu içinde köşe, kenar ve merkez kazıkların oturma ile ortalama çevre sürtünmesi f arasındaki ilişki ve grup içi konuma bağlı sürtünme dağılımı (Das, 2010, Şekil 11.38).	30
Şekil 3.6:	Kum zeminlerde kazık grubu veriminin η_g , aralık oranı d/D ve içsel sürtünme açısı ϕ' ile değişimi (Kishida ve Meyerhof, 1965 verilerinden, (Das, 2010, Şekil 11.39)).	31
Şekil 3.7:	Tüm senaryolar için örnek kazıkların kesit görünüşü.....	46
Şekil 5.1:	Çoklu başlıklı imalat düzeninin şematik görünümü ve A A kesiti. Şekil, birden fazla sondaj elemanının aynı merkez etrafında konumlandırılarak birlikte çalıştırılabildiği bir düzeni göstermektedir (Kong, Zhou, Liu, Zhou, & Cao, 2016).	75
Şekil 5.2:	Senaryolara göre maliyet bileşenleri özeti (Normal çakım varsayımı).	78
Şekil 5.3:	Senaryolara göre maliyet bileşenleri özeti (Birlikte çakım varsayımı).	78
Şekil 5.4:	Gevşek kum zemin koşulu için toplam maliyet karşılaştırması.	79
Şekil 5.5:	Orta sıkı kum zemin koşulu için toplam maliyet karşılaştırması.	79
Şekil 5.6:	Sıkı kum zemin koşulu için toplam maliyet karşılaştırması.	79



TEKİL KAZIKLARA ALTERNATİF OLARAK KULLANILAN ÇOKLU KAZIK GRUPLARININ ZEMİN VE MALZEME PARAMETRESİNE BAĞLI OLARAK SEÇİMİ VE MALİYET ANALİZİ

ÖZET

Bu tez çalışmasında, rekreatif amaçlı kazıklı bir iskelenin temel sistemi için tekil kazık ve çoklu mikro grup kazık alternatifleri, kohezyonsuz zeminlerde düşey taşıma gücü temelli güvenlik şartı altında maliyet odaklı olarak karşılaştırılmıştır. Çalışmanın temel amacı, uygulamada tasarımın erken safhalarında çok sayıda alternatifin hızlı biçimde ön elenmesi ve geriye kalan güvenli seçenekler arasından maliyet açısından rasyonel bir seçim yapılabilmesidir.

Senaryo yaklaşımıyla farklı çap, malzeme ve yerleşim düzenlerine sahip kazık alternatifleri tanımlanmıştır. Her senaryo için izin verilebilir düşey taşıma gücü hesaplanarak sabit kabul edilen tasarım talebini sağlayıp sağlamadığı kontrol edilmiştir. Kum zeminlerde kohezyonun ihmal edilebilir olması nedeniyle değerlendirme kazık çevresinde oluşan sürtünme direnci üzerinden yürütülmüştür. Böylece, zemin koşuluna uygun ve izlenebilir bir taşıma gücü hesabı ile maliyet karşılaştırmasına doğrudan temel oluşturan bir güvenlik filtresi oluşturulmuştur.

Uygun bulunan senaryolar için maliyet hesabı, mobilizasyon, hazırlık veya imalat ve çakma bileşenleri ayrıştırılarak yapılmış, birim fiyatlar AYGM'nin kıyı ve liman yapıları birim fiyat cetvelinden edinilmiştir. Çelik kazıklar için et kalınlığı 10 mm sabit kabul edilmiştir.

Çoklu mikro grup senaryoları için ayrıca normal çakım ve beraber çakım varsayımları ayrı bir duyarlılık çerçevesi olarak incelenmiştir. Beraber çakım, 7 mikro kazığın aynı anda çakılabildiği bir saha organizasyonu kabulünü temsil etmektedir. Bu durumda çakma metrajı eşdeğer çakım adedi üzerinden yeniden ifade edilerek çakma maliyetinin toplam maliyet içindeki payı azaltılabilmektedir. Buna karşılık, mikro grup düzenlerinde eşdeğer kesit alanının artması nedeniyle birim fiyat bandının daha üst aralığa çıkması mümkündür.

Sonuçlar, normal çakım varsayımı altında tekil ahşap kazık senaryolarının toplam maliyet açısından avantajlı bir çözüm kümesi sunduğunu göstermiştir. Beraber çakım varsayımının uygulanabilir kabul edildiği durumda ise özellikle ahşap mikro grup senaryolarında çakma maliyetindeki azalma belirginleşmiş ve maliyet sıralamasında önemli değişimler ortaya çıkmıştır. Bu bulgu, kazık düzeni seçiminin yalnızca taşıma gücü denetimi ve geometrik parametrelerle değil, saha organizasyonu ve birim fiyat bandı yönetimi gibi uygulama temelli kararlarla birlikte ele alınması gerektiğini göstermektedir.

Çalışmanın kapsamı, kum zeminlerde düşey taşıma gücü temelli bir değerlendirme ile sınırlandırılmış, yatay yükler, dinamik etkiler, kohezyonlu zeminler, oturma

performansı ve oyulma etkisinin nicel olarak modellenmesi kapsam dışında tutulmuştur. İleriki çalışmalarda, mikro kazık adedinin azaltıldığı alternatif grup düzenlerinin denenmesi, birim fiyat eşiklerinin tasarım değişkeni olarak sistematik biçimde yönetilmesi ve oyulma ile yatay yük etkilerini içeren performans temelli analizlerle karar destek çerçevesinin genişletilmesi önerilmektedir.



SINGLE PILES AND THEIR MULTI-PILE GROUP ALTERNATIVES SELECTION BASED ON SOIL AND MATERIAL PARAMETERS AND COST ANALYSIS

SUMMARY

Pile foundations are widely used to transfer structural loads to deeper and stronger soil layers when near-surface strata provide insufficient bearing capacity, when settlement control is critical, or when marine structures must be built under demanding ground conditions. In coastal engineering practice, piled systems are common in piers, jetties, and similar waterfront facilities because they offer constructional flexibility and can be arranged to match typical superstructure layouts. Nevertheless, selecting between a single-pile solution and a multi-pile group alternative remains a practical design problem that depends on soil conditions, pile geometry, material type, construction method, and total construction cost.

This thesis examines the selection of multi-pile groups as alternatives to single piles through a cost analysis framework that combines a scenario-based evaluation with traceable unit-price calculations. The study does not aim to build a continuous mathematical optimization model. Instead, a finite set of discrete design scenarios is defined, each scenario is checked against the same vertical design demand, infeasible options are eliminated, and the remaining feasible options are compared by total cost. This structure reflects early-stage engineering practice, where designers often need to screen alternatives quickly and transparently before proceeding to project-specific detailed analyses.

The engineering setting of the study is a recreational piled pier concept defined under typical dimensional constraints. The comparisons are performed under a constant vertical design demand so that the differences among scenarios can be attributed to pile type, geometry, and installation strategy rather than to changes in loading assumptions. The soil profile is represented by cohesionless soils (sand) with typical relative density states such as loose, medium-dense, and dense conditions. While cohesive soils and lateral load effects are essential for comprehensive marine design, the scenario calculations in this thesis are intentionally limited to vertical capacity in sands to maintain analytical clarity and to ensure consistent comparisons across alternatives.

The scenario set includes single-pile configurations and multi-pile group configurations. For group scenarios, seven micro-piles acting together are treated as an alternative to a larger single pile. Scenarios differ in pile diameter, embedded length, number of piles or number of groups, and arrangement-related assumptions as required by the geotechnical framework. The goal is to identify which scenarios satisfy the required allowable vertical resistance and to quantify how the corresponding total costs differ among feasible alternatives.

The geotechnical evaluation follows conventional practice by decomposing the ultimate vertical pile capacity into toe resistance and shaft resistance. For cohesionless

soils, both components are expressed as functions of effective stress and interface parameters. Allowable capacity is obtained by applying an appropriate safety factor to the ultimate capacity. The same analytical approach is used across all scenarios to ensure that the cost comparison is not influenced by changing calculation methods. Although detailed site investigation data, load testing, and settlement analyses would be expected in final design, the present study focuses on a consistent screening-level framework suitable for scenario comparison.

A central element of the thesis is the cost modeling approach based on official unit prices used in Türkiye for coastal and infrastructure works. The total cost is decomposed into three components: mobilization, preparation or ancillary works, and driving or installation. Mobilization is treated as a fixed project-level cost for the scenario comparisons. Preparation quantities are computed according to the relevant measurement rules. Driving cost is calculated by multiplying the applicable unit price by the installation quantity. For steel pipe piles, the wall thickness is fixed at 10 mm throughout the study so that material assumptions remain consistent.

In multi-pile group scenarios, the driving unit price is selected according to cross-sectional area ranges. For single piles, the relevant area is the pile cross-section. For micro-groups, the applicable unit price category is determined using an equivalent area defined as the sum of the cross-sectional areas of the seven micro-piles within a group. This choice is consistent with the intent of unit-price classifications that scale installation effort with the installed cross-section. As a result, micro-group scenarios may fall into higher unit price bands than individual micro-piles would suggest. The impact of this mechanism on total cost is explicitly included in the calculations.

To reflect construction practice, two installation perspectives are examined for micro-groups. The first is normal driving, where each micro-pile is installed separately and the driving quantity scales with the total driven length of all elements. The second is simultaneous driving, defined in this thesis as the case in which the seven micro-piles in a group can be installed as a single operational unit. Under this assumption, the driving quantity is represented using an equivalent number of driving operations. Mobilization and preparation costs are kept unchanged between the two perspectives so that the cost impact of the installation representation can be evaluated directly.

The results indicate that the cost ranking of alternatives is strongly influenced by the driving component and by how installation is represented for micro-groups. Under the normal driving perspective, single-pile solutions, particularly single timber pile arrangements, are generally cost-effective because the total driven length remains limited and the driving cost does not grow excessively. Since mobilization is fixed across scenarios, the primary differentiator becomes the combined magnitude of preparation and driving costs. In this setting, scenarios with moderate installation quantities and favorable unit price categories tend to perform better.

For steel micro-group scenarios, normal driving can lead to relatively high total cost because the total driven length increases with the number of micro-piles and driving becomes a major share of the budget. This finding should not be interpreted as a general rejection of steel micro-groups. It shows that, when each micro-pile is treated as a separate installation effort in the cost model, the cumulative driving quantity can outweigh other potential advantages.

When the simultaneous driving perspective is applied, total cost can decrease substantially in scenarios where driving dominates the budget. For timber micro-groups, the reduction in the driving quantity can produce a marked decrease in total cost even if the equivalent area places the unit price in a higher band. This outcome emphasizes that installation planning and operational assumptions can change economic conclusions as much as geometric design choices. If site conditions, equipment availability, and construction constraints realistically allow simultaneous installation, micro-group solutions become financially competitive and, in some cases, more economical than single-pile alternatives.

From an engineering viewpoint, the selection between a single pile and a pile group should be made with more than vertical capacity checks in mind. In coastal environments, redundancy and load sharing can be valuable under local seabed degradation mechanisms such as scour-related embedment loss at individual elements. In the literature, Yağcı (2017) highlights that group configurations may provide advantageous behavior in such settings. While scour is not modeled quantitatively in this thesis, the cost analysis indicates that multi-pile group solutions do not necessarily introduce a cost penalty when realistic installation perspectives are considered. Under certain conditions, they can also be economically advantageous.

The study also identifies a practical cost-control lever for timber micro-groups. Because unit prices for driving are selected by cross-sectional area ranges, small changes in pile diameter or group composition may shift a scenario into a different cost band and cause a discontinuous change in driving unit price. Therefore, managing the equivalent cross-sectional area so that it remains within a favorable band can reduce total cost. In early-stage design, pile diameter selection and group size can be treated as deliberate design variables to control the unit price band while maintaining geotechnical safety.

The limitations of the thesis should be stated clearly. The scenario comparisons are limited to vertical bearing capacity checks in cohesionless soils. Lateral loads from waves, currents, wind, berthing and mooring, and seismic actions are not included in the quantitative evaluation. Settlements and serviceability performance are not modeled in detail. Scour is not computed using hydrodynamic or morphodynamic methods; its relevance is acknowledged and discussed qualitatively. Finally, while official unit prices provide a traceable basis, project-specific market conditions and contractor productivity can change absolute costs. The comparative insights remain useful as an early-stage decision aid within the assumptions adopted.

Within these boundaries, the thesis provides a structured and transparent framework for comparing pile system alternatives under a fixed vertical design demand. The main conclusions are as follows. Under normal driving, single-pile configurations, particularly timber single piles, tend to be economically favorable within the examined scenario set. Micro-group alternatives can become highly competitive when simultaneous driving is feasible and when unit price band effects are managed through equivalent-area-aware design. Once mobilization is fixed, differences among feasible alternatives are driven primarily by installation-related costs. Installation representation and operational planning therefore have a decisive influence on total cost outcomes.

Future work can expand the framework in several directions. Extending the scenario set to cohesive soils would broaden applicability to a wider range of coastal ground conditions. Incorporating lateral pile behavior using p–y curves and soil-structure interaction models would enable performance-based comparisons under combined vertical and horizontal demands. Quantifying scour through empirical relations or coupled hydrodynamic and sediment transport analyses would allow the redundancy advantage of pile groups to be evaluated numerically. Finally, extending the scope from initial construction cost to life-cycle considerations, including durability, corrosion protection, maintenance, and environmental indicators such as embedded carbon, would align the framework with modern sustainability-oriented design practice while preserving the transparency of scenario-based evaluation.



1. GİRİŞ

1.1 Tezin Amacı

Kazık temeller, üst zemin tabakalarının yetersiz taşıma gücüne sahip olduğu, oturma sınırlarının kritik hâle geldiği veya kıyı ve liman yapılarında olduğu gibi su altında inşa koşullarının bulunduğu durumlarda yüklerin güvenle daha derin tabakalara aktarılmasını sağlayan başlıca derin temel sistemleridir. Tekil kazıklar ve kazık grupları, farklı zemin profilleri altında çalışan yapılar için, yüzeysel temellere kıyasla daha kontrol edilebilir bir yük aktarımı ve daha öngörülebilir bir zemin temel etkileşimi sunmaktadır (Das, 2010).

Kıyı mühendisliği uygulamalarında kazıklı iskele sistemleri, zemin kazık etkileşiminin yanı sıra dalga ve akım etkileri, oyulma (scour) ve marin ortam koşulları nedeniyle çok bileşenli bir tasarım problemine dönüşmektedir. Dalga etkisi altında kazıklı iskele türü yapılara ilişkin sayısal incelemeler, dalga periyodu, kazık aralığı ve zemin koşullarının kazıklarda gelişen iç kuvvetler ve deplasmanlar üzerinde belirgin etkileri olduğunu göstermektedir (Fındık, Çelik, Keskin, & Öztürk, 2020). Bununla birlikte, uygulamada ön tasarım safhasında çoğu zaman ilk ihtiyaç, ayrıntılı hidrodinamik ve yapısal çözümlemelerden önce, düşey taşıma gücü temelli geoteknik uygunluk ve buna bağlı maliyet karşılaştırması üzerinden alternatiflerin hızlı biçimde elenmesidir.

Bu tez, rekreatif amaçlı tipik bir kazıklı iskele ayağı için kohezyonsuz zeminlerde (kum) çalışan tekil kazık düzenleri ile çoklu kazık grubu düzenlerini, tanımlı bir senaryo kümesi üzerinden maliyet performansı açısından karşılaştırmayı amaçlamaktadır. Temel hedef, düşey taşıma gücü açısından güvenli kabul edilen alternatifler arasından toplam yapım maliyeti en düşük çözümün belirlenmesidir.

Bu tezde izlenen yöntem, referans bir senaryo üzerinden izin verilebilir taşıma gücü hesaplayıp, diğer alternatiflerin de bu koşulu sağladığı koşullar hesaplanmıştır. Belirlenen senaryolar için toplam yapım maliyeti, AYGM kıyı ve liman yapıları birim

fiyat/poz tarifleri (T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı Altyapı Yatırımları Genel Müdürlüğü (AYGM), 2025) esas alınarak hesaplanmış ve karşılaştırmalar yapılmıştır.

Yağcı (2017) çalışmasındaki çoklu kazık dizilimlerinin grup davranışı nedeniyle tekil elemanlara kıyasla farklı performans karakteristikleri sergileyebileceği ve kıyı ortamlarında akım, yapı ve taban etkileşimi kapsamında oyulma gibi lokal zemin kayıplarının tasarımı belirleyici olduğu vurgulanmaktadır (Yağcı, Yıldırım, Çelik, Kitsikoudis, Duran, & Kırca, 2017).

Senaryo kurgusunda bu yaklaşım rekreatif iskele kazıklarının zemin parametrelerine bağlı olarak taşıma gücü bağlamında maliyet odaklı bir değerlendirme çerçevesine uyarlanmıştır ve taşıma gücüne olan etkisi ile beraber maliyet performansı da ele alınmıştır.

1.2 Tezin Kapsamı

Bu tez, kohezyonsuz zeminlerde (kum) çalışan rekreatif amaçlı bir iskelenin tipik bir temeli esas alınarak, tekil kazıklar ile çoklu kazık gruplarına ilişkin alternatif senaryoların sabit düşey yükler altında geoteknik açıdan güvenli kabul edilen çözümler arasından seçilmesi ve bu çözümlerin maliyet performanslarının karşılaştırılmasını kapsamaktadır. Çalışma boyunca kullanılan genel yaklaşım, tanımlı senaryolarda önce geoteknik uygunluk şartının sağlanması, ardından uygun çözümler arasından maliyet analizinin yapılmasıdır.

Çalışmanın birinci aşamasında, kazıkların düşey taşıma kapasitesine ilişkin kuramsal ve ampirik yaklaşımlar derlenmektedir. Kohezyonsuz zeminlerde çevre sürtünmesi bileşeni, güvenlik katsayılarının seçimi ve uygulama adımları temel bir hesap çerçevesi içinde sunulmaktadır (Das, 2010). Kohezyonlu zeminlere (kil) ilişkin yaklaşımlar literatür bütünlüğü açısından arka plan bilgisi düzeyinde ele alınmakta, senaryo analizleri ve maliyet karşılaştırmaları kum zeminler ile sınırlandırılmaktadır.

İkinci aşamada, rekreatif amaçlı iskeleler için tipik bir plan geometrisi ve üstyapı yük kabulleri tanımlanmakta, bu kabuller altında tüm kazık senaryoları aynı düşey tasarım talebini karşılayacak biçimde kurgulanmaktadır. Böylece, tekil kazık ve çoklu

kazık grubu çözümleri arasında karşılaştırılabilirlik, ortak bir talep seviyesi üzerinden sağlanmaktadır.

Üçüncü aşamada, kohezyonsuz zeminler için (gevşek, orta sıkı ve sıkı kum) tekil kazık ve çoklu kazık grubu senaryoları oluşturulmakta beraber kazık çapı, kazık boyu, kazık sayısı gibi parametreler geoteknik açıdan kabul edilebilir aralıklarda değiştirilerek alternatifler tanımlanmaktadır. Kazık gruplarında grup etkisi, literatürde önerilen verim katsayısı ve basitleştirilmiş grup etki yaklaşımları üzerinden temsil edilmekte ve aynı düşey tasarım talebini sağlayan alternatiflerin eşdeğer ölçekte kıyaslanması hedeflenmektedir (Das, 2010).

Dördüncü aşamada, düşey taşıma gücü açısından güvenli olduğu belirlenen her senaryo için maliyet hesabı yapılmaktadır. Bu kapsamda, mobilizasyon, hazırlık, kazık temini/imalatı ve çakım/imalat ekipmanı gibi maliyet bileşenleri ayrı ayrı ele alınmakta, tüm kalemler AYGM birim fiyatları temelinde mali karşılığa dönüştürülmektedir (T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı Altyapı Yatırımları Genel Müdürlüğü (AYGM), 2025). Bazı senaryolarda saha uygulamasına ilişkin beraber çakım gibi varsayımlar, maliyet sonuçlarının duyarlılığını görmek amacıyla alternatif maliyet senaryosu olarak ayrıca değerlendirilebilmektedir. Gerekli durumlarda tamamlayıcı birim fiyat/rayiç bilgisi ÇŞİDB kaynaklarından sağlanmaktadır (T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2025).

Çalışmanın kapsamı, yükleme ve performans ölçütü açısından düşey taşıma gücü temelli bir değerlendirme ile sınırlandırılmıştır. Yatay yükler, dalga/deprem gibi dinamik etkilerin zaman tanım alanında ayrıntılı analizi, oyulmanın nicel olarak modellenmesi ve oturma değerlendirmeleri bu tez kapsamının dışında tutulmuş, bu başlıklar sonuçların tartışıldığı bölümde ileriki çalışmalar için geliştirme alanları olarak ele alınmıştır (Fındık, Çelik, Keskin, & Öztürk, 2020).

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu bölümde, kıyı ve liman yapıları bağlamında kazıklı iskele sistemlerinin genel tasarım çerçevesi özetlenmekte, kazık temellerin sınıflandırılması ve düşey taşıma gücüne ilişkin kuramsal arka plan derlenmektedir. Ayrıca kazık gruplarının davranışı ve geoteknikte maliyet tabanlı karar verme yaklaşımları incelenerek, bu tezin literatürde konumlandığı boşluk tanımlanmaktadır.

2.1 Kıyı Yapıları, Derin Temeller ve Kazıklı İskele Sistemleri

2.1.1 Kıyı yapıları ve kazıklı iskele sistemleri

Kıyı yapıları, dalgakıranlar, rıhtımlar, iskeleler, yanaşma platformları, liman ve balıkçı barınakları ile su alma ve deşarj yapıları gibi farklı işlevlere sahip, deniz ve kara sistemleri arasındaki geçiş bölgesinde yer alan yapılardır. Tasarımda temel hedef, dalga, akıntı, rüzgâr, gemi ve deprem etkileri altında güvenli, işlevsel ve ekonomik çözümler elde edilmesidir. Türkiye’de kıyı ve liman yapılarının planlaması ve tasarımı için Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı Altyapı Yatırımları Genel Müdürlüğü tarafından yayımlanan Kıyı Yapıları Planlama ve Tasarım Teknik Esasları temel bir başvuru kaynağıdır (T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı Altyapı Yatırımları Genel Müdürlüğü, 2016). Uluslararası ölçekte ise ABD Ordusu Mühendisler Birliği tarafından hazırlanan Coastal Engineering Manual (CEM), kıyı süreçleri ve yapı tasarımına ilişkin kapsamlı bir referans niteliğindedir (USACE, 2002).

İskeleler, gemi ve teknelerin yanaşmasına, yolcu ve yük transferine veya rekreatif kullanıma hizmet eden, kıyıdan denize doğru uzanan ince ve uzun yapılardır. Kazıklı iskele sistemlerinde üstyapının düşey ve yatay yükleri kazıklar aracılığıyla zemine aktarılır. Bu yapılarda kazıklar hem düşey yükleri (ölü yük, hareketli yük, üstyapı ekipmanları vb.) hem de yatay yükleri (dalga, akıntı, rüzgâr, yanaşma ve bağlama yükleri, deprem etkisi) taşıyan ana taşıyıcı eleman konumundadır (ASCE/COPRI,

2014; USACE, 2002). CEM ve benzeri kılavuzlar, dalga ve akıntı yüklerinin hesabında Morison tipi formülasyonları, gemi yanaşma yüklerinde çarpışma enerjisi yaklaşımlarını ve bağlama yüklerinde halat kuvvetlerine dayalı hesap yöntemlerini önermektedir (USACE, 2002).

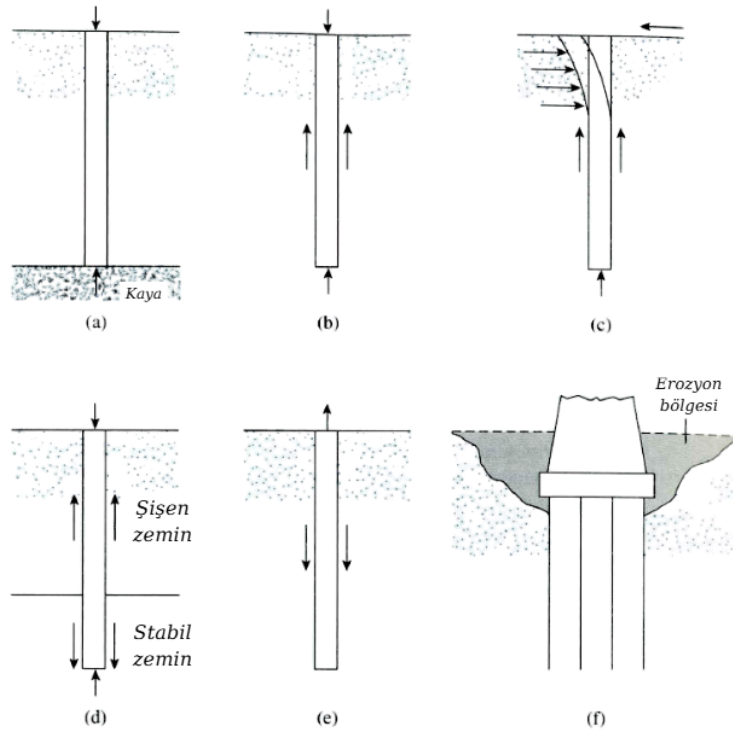
Türkiye’de yapılan çalışmalar incelendiğinde, kazıklı iskele ve rıhtım yapılarının hidrolik ve yapısal davranışını ele alan tez ve makalelerin önemli bir yer tuttuğu görülmektedir. Deprem etkileri altında kazıklı rıhtım ve iskelelerin performansını araştıran çalışmalarda zemin–yapı etkileşimi üç boyutlu sonlu eleman modelleri ile temsil edilmekte, kazık boyu, çapı, yerleşimi ile zemin sınıfının sistem davranışına etkisi tartışılmaktadır (Korkmaz, 2012; Wang, Li, Zhang, et al., 2023). Dalga yükleri altındaki kazıklı iskele davranışını inceleyen çalışmalarda ise kazık çapı, aralıkları ve kazık–üst yapı bağlantı detaylarının iç kuvvet ve deplasmanlara etkisi öne çıkmaktadır (Fındık, Çelik, Keskin, & Öztürk, 2020). Bu çalışmalar, kazıklı iskele tasarımında üstyapı kadar zemin ve temel koşullarının da belirleyici olduğunu göstermektedir.

Kazıklı iskelelerde temel sistemi çoğu zaman toplam yatırım maliyetinin önemli bir bileşenidir. Zayıf zemin koşullarında kazık sayısı, boyu ve çapının artması, hem geoteknik hem de ekonomik açıdan ön tasarım aşamasında hızlı ve izlenebilir alternatif kıyasını gerekli kılmaktadır. Bu tez, söz konusu ihtiyacı doğrudan hedeflemekte, rekreatif amaçlı bir iskele ayağı için, düşey taşıma gücü temelli ön yeterlilik ve kamu birim fiyatlarına dayalı maliyet karşılaştırması üzerinden senaryo temelli bir karar çerçevesi kurmaktadır.

2.1.2 Derin temel sistemleri ve kazık temeller

Derin temeller, taşıyıcı sistemden gelen yüklerin yüzeye yakın zayıf tabakalar yerine daha derinde yer alan ve mühendislik özellikleri daha iyi olan tabakalara güvenli bir şekilde aktarılması amacıyla kullanılan temel sistemleridir. Klasik tanıma göre temel gömme derinliğinin temel genişliğinin yaklaşık üç katından büyük olması, derin temel davranışının belirginleştiği bir sınır olarak kabul edilmektedir (Coduto, 2001; Das, 2010). Bu kapsamda kazık temeller, sondaj kazıkları (drilled shafts), kesonlar ve kazıklı radye sistemleri derin temel türleri arasında değerlendirilmektedir (Poulos, 2017; Poulos & Davis, 1980).

Kıyı ve liman mühendisliği uygulamalarında derin temeller çoğu zaman yalnızca alternatif bir çözüm değil, zemin–yapı etkileşiminin izin verdiği tek rasyonel çözüm konumundadır. Das (Das, 2010) tarafından derlenen tipik durumlar Şekil 2.1’de özetlenmektedir. Buna göre, derindeki sağlam kaya veya yüksek taşıma gücüne sahip tabakalara yük aktarılması gereken hallerde (a), üstyapının sürtünme ve yukarı yöndeki yükler altında kaldığı durumlarda (b), yatay yüklerin (dalga, rüzgâr, deprem vb.) ön planda olduğu sistemlerde (c), yüzeye yakın şişen veya hacim değiştiren zeminlerin bulunduğu zemin profillerinde (d), kalın sıkışabilir tabakalar nedeniyle oturma kontrolünün kritik hale geldiği senaryolarda (e) ve oyulma/erozyon etkisiyle zaman içinde temel emniyetinin azalabileceği marina ortamlarda (f) kazık temeller zorunlu hale gelmektedir. Kazıklı iskele sistemleri, özellikle (c), (e) ve (f) durumlarının aynı anda gerçekleştiği kıyı ortamlarında bu nedenle tercih edilmekte ve ulusal/uluslararası kılavuzlarda da bu yönde önerilmektedir (ASCE/COPRI, 2014; T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı Altyapı Yatırımları Genel Müdürlüğü, 2016; USACE, 2002).



Şekil 2.1: Kazık temellerin kullanımını gerektiren tipik zemin ve yükleme koşulları: (a) derindeki sağlam kaya tabakasına yük aktarımı, (b) sürtünme ve yukarı yöndeki yükler, (c) yüksek yatay yükler altında çalışan sistemler, (d) yüzeye yakın şişen zeminlerin bulunduğu profiller, (e) kalın sıkışabilir tabakalar nedeniyle aşırı oturma riski, (f) oyulma ve erozyon etkisi altındaki temeller (Das, 2010).

Liman ve kıyı yapılarında oturma performansı çoğu zaman taşıma gücü kadar kritik bir tasarım çıktısıdır. Elgabaly vd. (2025), Dekheila Limanı'nda tam yüklü konteyner raft temellerinde izleme verileri ve zemin–yapı etkileşimi modellemesi üzerinden diferansiyel oturma ve düzensiz yük dağılımı problemlerini tartışmıştır. İyileştirme veya kazıklı çözüm gibi önlemlerin performans kontrolünde belirleyici olabileceğini göstermiştir. Bu tür tam ölçek saha verileri, ön tasarımda kullanılan basitleştirilmiş kabullerin hangi koşullarda kalibre edilmesi gerektiğine ilişkin değerli bir çerçeve sunmaktadır (Elgabaly et al., 2025).

2.2 Kazıkların Sınıflandırılması

Kazık temeller, üstyapı yüklerinin derindeki daha güvenli tabakalara aktarılması, oturmaların kontrolü ve zayıf üst tabakaların devre dışı bırakılması amacıyla kullanılan derin temel elemanlarıdır (Das, 2010; Tomlinson & Woodward, 1994). Literatürde kazıklar, malzeme türü, imalat yöntemi, yük aktarım mekanizması, geometri ve kullanım amacı gibi ölçütlere göre sınıflandırılmaktadır (Poulos & Davis, 1980; Randolph, 2003). Kıyı yapıları bağlamında bu sınıflandırma, yalnızca yapısal performansı değil, imalat süreci, şantiye erişilebilirliği, korozyon dayanımı ve toplam maliyeti de doğrudan etkilemektedir.

2.2.1 Malzemeye göre kazıklar

Malzemeye bağlı olarak ahşap, çelik, betonarme/öngerilmeli beton ve kompozit kazık tipleri öne çıkmaktadır. Ahşap kazıklar tarihsel olarak liman ve iskele uygulamalarında kullanılmış, düşük birim maliyet ve hızlı tedarik gibi avantajlar sağlamıştır (Tomlinson & Woodward, 1994). Buna karşılık sınırlı eksenel/eğilme kapasitesi ve biyolojik bozunma riskleri güncel uygulamalarda kullanım alanını daraltmaktadır.

Betonarme ve öngerilmeli beton kazıklar yüksek basınç dayanımı ve prefabrik üretime bağlı kalite kontrol avantajları nedeniyle yaygındır (Das, 2010). Ancak taşıma/çakma lojistiği, başlık kirişi detayları ve şantiye ekipman gereksinimleri maliyet ve program üzerinde belirleyici olabilir (Poulos & Davis, 1980).

Çelik kazıklar (özellikle çelik boru kazıklar), yüksek dayanım ve hızlı çakım imkanı nedeniyle kıyı yapılarında yaygın biçimde tercih edilmektedir (American

Petroleum Institute, 2014; DNV GL AS, 2017). Marina ortamda korozyon riski, koruyucu kaplama, katodik koruma ve korozyon payı gibi ilave önlemleri gerekli kılar (Melchers, 2003). Kompozit ve bileşik kesitli kazıklar ise uzun servis ömrü ve dayanıklılık hedeflenen özel uygulamalarda alternatif oluşturur (Bank, 2006; Fam, Greene, & Rizkalla, 2003). Son yıllarda, marina ortamda dayanıklılık ve servis ömrü hedefleri doğrultusunda hibrit/kompozit kazık çözümleri daha görünür hale gelmiştir. Bu kapsamda çelik-beton ve ahşap-beton hibrit kompozit kazıklar; korozyon dayanımı, rijitlik/taşıma gücü gereksinimleri ve yapım pratikleri açısından alternatif bir tasarım uzayı sunmaktadır. Zhong vd. (2025), sahada ve sayısal analizlerle hibrit kompozit kazıkların düşey yük altındaki mekanik davranışını inceleyerek taşıma gücü ve deformasyon yanıtının, malzeme bileşimi ve arayüz davranışına duyarlı olduğunu göstermiştir. Bu bulgular, kazık malzemesi seçiminin yalnız dayanım değil, servis performansı ve dayanıklılık hedefleri ile birlikte değerlendirilmesi gerektiğini desteklemektedir (Zhong, Chen, Zhou, Li, Zong, Dou, Liu, & Wen, 2025).

Bu tezde, rekreatif amaçlı iskele ayağı bağlamında sahada yaygın ve maliyet verisi izlenebilir olan kazık türleri esas alınmış, özellikle çelik boru kazıklar ve ahşap kazıklar maliyet tabanlı kıyasın ana eksenini oluşturmuştur.

2.2.2 İmalat - uygulama yöntemine göre kazıklar

İmalat yöntemine göre kazıklar temel olarak çakma (driven) ve yerinde dökme (bored/cast-in-place) sistemler olarak iki ana grupta ele alınmaktadır. Çakma kazıklarda prefabrik elemanlar hidrolik veya dizel çekicilerle zemine sokulur, kumlu zeminlerde çakım sürecinin çevrede sıkışma etkisi yaratabileceği ve çevresel sürtünme mobilizasyonunu artırabileceği belirtilmektedir (Das, 2010; Tomlinson & Woodward, 1994). Buna karşılık titreşim ve gürültü, kentsel ve hassas bölgelerde sınırlayıcı olabilir (Broms, 1981).

Yerinde dökme kazıklarda delgi ile oluşturulan kuyular betonla doldurulur. Gürültü/titreşimin düşük olması avantaj sağlarken, zemin duvar stabilitesi, yeraltı suyu, çamur kullanımı ve beton kalitesi gibi faktörler üretim kalitesini doğrudan etkiler (Poulos & Davis, 1980; Randolph, 2003). Bu tezde maliyet analizi,

kamu poz tarifleriyle doğrudan eşleştirilebilen çakma ağırlıklı iş kalemleri üzerinden kurgulanmıştır.

2.2.3 Yük aktarım mekanizmasına göre kazıklar

Yük aktarım mekanizmasına göre kazıklar, uç kazıkları, sürtünme kazıkları ve kombine kazıklar olarak sınıflandırılmaktadır (Das, 2010). Uç kazıklarında taşıma büyük ölçüde kazık ucunda mobilize edilen dayanımdan sağlanır ve kazık genellikle sağlam tabakaya oturtulur (Poulos & Davis, 1980). Sürtünme kazıklarında ise yükün önemli kısmı kazık çevresinde mobilize edilen çevresel sürtünme ile taşınır, kalın kum tabakaları gibi profillerde bu davranış sık görülür (Das, 2010; Randolph, 2003). Kombine davranışta her iki bileşen birlikte etkindir.

2.2.4 Zemin iyileştirme amaçlı kompaksiyon kazıkları

Kompaksiyon kazıkları, çoğunlukla taşıyıcı eleman olmaktan ziyade granüler zeminlerin sıkılığını artırmak amacıyla kullanılan kısa elemanlardır (Das, 2010). Kazıklı iskele uygulamalarında, taşıyıcı kazıkların oturduğu dolgu veya doğal zeminin iyileştirilmesi bağlamında gündeme gelebilir, ancak bu tezde ana taşıyıcı sistem olarak ele alınmamıştır.

2.3 Kazıklarda Düşey Taşıma Gücü

Kazık temellerin geoteknik tasarımında temel hedef, kazığın düşey taşıma gücünün zemin özellikleri ile birlikte güvenli ve rasyonel biçimde değerlendirilmesidir. Klasik kaynaklarda tekil kazığın nihai düşey taşıma gücü, uç taşıma gücü ve çevresel sürtünme bileşenlerinin toplamı olarak ifade edilir (Coduto, 2001; Das, 2010):

$$Q_u = Q_p + Q_s. \quad (2.1)$$

Burada Q_p uç taşıma gücünü, Q_s çevresel sürtünmeyi göstermektedir. İzin verilebilir taşıma gücü (Q_{all}),

$$Q_{all} = \frac{Q_u}{FS} \quad (2.2)$$

şeklinde tanımlanmakta ve FS (Güvenlik Katsayısı) literatürde çoğunlukla tekil kazıklar için 2,0–3,0 aralığında önerilmektedir (Das, 2010). Kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminlerde Q_p ve Q_s bileşenlerinin hesaplanmasında kullanılan yaklaşımlar farklılaşmakta, bu farklılık temelde drenaj koşulları ve efektif gerilme ile ilişkilidir (Das, 2010; Kumbasar & Kip, 1999).

2.4 Kohezyonlu Zeminlerde Kazık Taşıma Gücü

Kohezyonlu (kil) zeminlerde kısa vadeli tasarım çoğunlukla drenajsız davranış kabulüyle yapılır ve kazık ucu taşıma gücü zeminin drenajsız kayma dayanımı c_u cinsinden ifade edilir (Das, 2010):

$$Q_p = A_p N_c c_u. \quad (2.3)$$

Burada A_p kazık taban alanı, N_c taşıma gücü katsayısıdır (uzun kazıklar için sıklıkla $N_c \approx 9$ alınmaktadır). Çevresel sürtünme kil zeminlerde aderans katsayısı α ile yazılabilir:

$$Q_s = \sum_i \alpha_i c_{u,i} A_{s,i}, \quad (2.4)$$

burada $A_{s,i}$ kazığın ilgili tabakada kalan çevre alanıdır (Coduto, 2001; Kumbasar & Kip, 1999).

Kumbasar ve Kip, kazık taşıma gücünü uç ve çevre katkılarını birlikte ele alan bir denge ifadesiyle sunmakta, ayrıca kazığın yerini alan zeminin ağırlığını da tartışmaktadır (Kumbasar & Kip, 1999). Bu tezde kohezyonlu zeminler, literatür bütünlüğü açısından arka plan bilgisi düzeyinde ele alınmış, senaryo analizleri ve maliyet karşılaştırmaları kohezyonsuz (kum) zeminlerle sınırlandırılmıştır.

2.5 Kohezyonsuz Zeminlerde Kazık Taşıma Gücü

Kohezyonsuz (kum) zeminlerde kazık uç taşıma gücü, temel seviye derinliğindeki efektif düşey gerilme ve içsel sürtünme açısı ϕ ile ilişkilendirilir. Kumbasar ve Kip (1999), kazık ucu dayanımını

$$q_d = p_0 N_q \quad (2.5)$$

şeklinde ifade etmekte, burada $p_0 = \gamma D_f$ efektif düşey gerilmeyi, N_q ise ϕ ile ilişkili taşıma gücü katsayısını temsil etmektedir (Kumbasar & Kip, 1999). Bu durumda uç taşıma gücü $Q_p = A_p q_d$ olur.

Kum zeminlerde çevresel sürtünme çoğunlukla yatay toprak basıncı temelli yaklaşımla modellenir. Birim çevre sürtünmesi,

$$f_s = p_h \tan \delta \quad (2.6)$$

şeklinde yazılabilir, burada $p_h = K p_0$ yatay basıncı, K yatay toprak basıncı katsayısını ve δ zemin–kazık arayüz sürtünme açısını ifade eder (Kumbasar & Kip, 1999). Böylece

$$Q_s = \sum_i f_{s,i} A_{s,i} \quad (2.7)$$

ile tabakalı profillerde çevresel sürtünme hesaplanabilir.

Uluslararası literatürde kum zeminlerde uç ve çevre bileşenleri için efektif gerilme temelli farklı formülasyonlar ve katsayı setleri önerilmiştir (Coduto, 2001; Das, 2010).

2.6 Kazık Grupları ve Kazıklı İskele Sistemlerinin Davranışı

Uygulamada kazık temeller çoğu zaman tekil elemanlar halinde değil, kazık grupları şeklinde tasarlanır ve yükler kazık başlık kirişi/konstrüksiyon detayı ile kazıklara dağıtılır. Bu durumda zemin–kazık–kazık etkileşimi nedeniyle grup davranışı tekil kazığa kıyasla farklılaşabilir. Grup davranışı çoğunlukla grup verimliliği ile ifade edilir:

$$\eta = \frac{Q_{u, \text{grup}}}{n Q_{u, \text{tek}}} \quad (2.8)$$

Burada n kazık sayısını, $Q_{u, \text{grup}}$ grup nihai taşıma gücünü, $Q_{u, \text{tek}}$ ise tekil kazık nihai taşıma gücünü göstermektedir (Poulos & Davis, 1980).

Grup verimliliği, kazık aralıkları, zemin türü, imalat yöntemi ve yükleme biçimi gibi etkenlere bağlıdır. Kohezyonlu zeminlerde küçük aralıklı gruplarda blok davranışının belirginleşebildiği, buna karşılık daha geniş aralıklı düzenlerde tekil kazık yaklaşımına yakın sonuçlar elde edilebildiği literatürde tartışılmaktadır (Pirrello & Poulos, 2014; Poulos & Davis, 1980). Kohezyonsuz zeminlerde grup verimliliği, kazık aralığı (s/D), kazık sayısı ve yerleşim geometrisine ek olarak kullanılan ampirik yaklaşımın varsayımlarına bağlı olarak değişebilmektedir. Ateş ve Şadoğlu (2023), kum zeminde çakma kazık grupları için farklı ampirik grup verimliliği yöntemlerini karşılaştırmış ve grup verimliliğinin kazık sayısı ile artma eğiliminde olduğunu, belirli bir kazık adedinden sonra artışın sınırlanabildiğini tartışmıştır. Bu tür karşılaştırmalar, ön tasarım safhasında tekil kazık yaklaşımından grup davranışına geçerken belirsizliğin hangi parametrelerde yoğunlaştığını görünür kılmaktadır (Ateş & Şadoğlu, 2023).

Kazıklı iskelelerde kazık aralıkları, bir yandan geoteknik grup davranışını, diğer yandan üstyapı kiriş/döşeme sisteminin iç kuvvet dağılımını etkiler. Aralıkların çok küçük seçilmesi grup verimliliğini olumsuz etkileyebilirken, aralıkların büyütülmesi üstyapı elemanlarında kesit taleplerini artırarak yapısal maliyet üzerinde baskı oluşturabilir. Bu nedenle kazık grubu davranışına ilişkin analitik ve yarı-ampirik yaklaşımlar, kıyı yapılarında zemin–temel–üstyapı dengesinin anlaşılması açısından kritik bir arka plan sunmaktadır.

2.6.1 Kazıklı iskele sistemlerinde zemin yapı etkileşimi ve yatay yükler

Kazıklı iskele sistemleri dalga, akıntı, rüzgâr, yanalma/bağlama ve deprem gibi önemli yatay yükler altında da çalışır. Yatay yükler altındaki kazık davranışının modellenmesinde yaygın yaklaşım, p – y eğrilerine dayalı Winkler tipi zemin modeli olarak öne çıkmaktadır (Das, 2010).

Kazık gruplarında yatay yükler altında yük paylaşımını belirleyen unsurlardan biri de kazık başlığı rijitliği ve geometrisidir. Li vd. (2025), farklı kazık başlığı düzenlerinin yatay yük altındaki yük aktarımını ve kazıklar arası yük paylaşımını etkilediğini ortaya koyarak, grup davranışının yalnız kazık–zemin etkileşimi değil üst yapı/başlık detayları ile birlikte değerlendirilmesi gerektiğini vurgulamıştır (Li, Aghazadeh, & Langlois, 2025).

Türkiye’de yapılan bazı çalışmalarda düşey ve eğik kazıklı sistemlerin yatay deplasman ve iç kuvvet talepleri karşılaştırılmış, eğik kazıklı sistemlerin deplasmanı azaltırken iç kuvvetleri artırabildiği gösterilmiştir (Korkmaz, 2012). Dalga yükleri altındaki kazıklı iskele davranışına odaklanan çalışmalarda ise kazık rijitliği, kazık–üst yapı bağlantısı ve kazık aralıklarının etkisi tartışılmıştır (Fındık, Çelik, Keskin, & Öztürk, 2020). Bu tezde yatay yükler ve dinamik etkiler, literatür bağlamı ve sonuçların tartışılması düzeyinde ele alınmış, senaryo uygunluk değerlendirmesi düşey taşıma gücü temelli bir ön seçim çerçevesi ile sınırlandırılmıştır.

Senaryo uygunluk değerlendirmesi düşey taşıma gücü temelli bir ön seçim çerçevesi ile sınırlandırılmış olsa da, marina ortamda deprem ve sıvılaşma etkileri bazı projelerde temel sistemi seçimini doğrudan belirleyebilmektedir. Ghassemi vd. (2025), sıvılaşma koşullarında yapılan shaking-table deneyleri üzerinden mikrokazıkların sismik yanıtı etkisini inceleyerek, zemin iyileştirmesi ve rijitlik artışı bağlamında mikrokazıkların potansiyel katkılarını tartışmıştır. Bu tür çalışmalar, senaryo temelli yaklaşımın ileride dinamik performans göstergeleri ile genişletilebileceğini göstermektedir (Ghassemi et al., 2025).

2.7 Tekil Kazıklara Alternatif Olarak Çoklu Kazık Grubunun Kullanılması ve Maliyet Analizi

Derin temel sistemlerinde maliyet tabanlı değerlendirmeler, özellikle çok sayıda alternatifin bulunduğu ön tasarım safhasında seçim problemini rasyonelleştirmek açısından önem taşır. Bu kapsamda öne çıkan yaklaşımlardan biri, Komurka tarafından önerilen *foundation support cost* kavramıdır (Komurka, 2015). Bu yaklaşım, bir temel sisteminin birim taşıma kapasitesi başına maliyetini tanımlayarak farklı temel çözümlerinin karşılaştırılmasına imkân vermekte, imalat maliyetleri, kalite kontrol ve şantiye riskleri gibi bileşenlerin bütünsel yorumlanmasını desteklemektedir.

Literatürde kazık temeller için maliyet minimizasyonu veya çok amaçlı (maliyet çevresel etki) değerlendirme içeren çalışmalar bulunmaktadır. Kazık boyu/çapı/sayısı gibi parametrelerin tasarım değişkeni olarak ele alındığı ve kısıtların geoteknik yapısal sınır durumlar üzerinden tanımlandığı örnekler mevcuttur (Letsios, Lagaros, & Papadrakakis, 2014; Leung, Chow, & Shen, 2010). Son dönemde, yalnız ekonomik

maliyet değil malzeme üretimi, imalat, nakliye ve şantiye faaliyetleri sırasında ortaya çıkan karbon emisyonu ve malzeme tüketimi gibi çevresel göstergeleri de içeren değerlendirmeler gündeme gelmiştir. Bu kapsamda, örneğin çelik kazık tasarımında malzeme tüketimini ve CO₂ eşdeğeri emisyonları azaltmayı hedefleyen çerçeveler önerilmiştir (Akbay Arama, Kayabekir, Bekdaş, & Geem, 2020; Jelušić, 2024).

Son dönemde temel sistemi seçiminde yalnız ilk yatırım maliyeti değil, gömülü karbon ve çevresel etkilerin de karar kriteri olarak ele alındığı çok amaçlı çerçeveler artmaktadır. Abushama vd. (2025), beton, çelik ve ahşap kazık alternatiflerinde inşaat maliyeti ile gömülü karbonun birlikte optimize edildiği bir yaklaşım sunarak, farklı malzeme/çözüm kombinasyonlarının maliyet-karbon dengesi açısından belirgin biçimde ayrışabileceğini göstermiştir. Bu perspektif, kamu birim fiyatlarına dayalı maliyet hesabı yapılan çalışmalarda dahi, ileride genişletilebilir bir karar destek omurgası olarak değerlendirilebilir (Abushama et al., 2025).

Bununla birlikte bu çalışmaların önemli bir bölümü, proje özel ayrıntılı sayısal modeller veya ileri optimizasyon algoritmaları gerektirmekte, günlük tasarım pratiğinde hızlı ön eleme ihtiyacına doğrudan cevap vermeyebilmektedir (Chen, Liu, Zhang, et al., 2021).

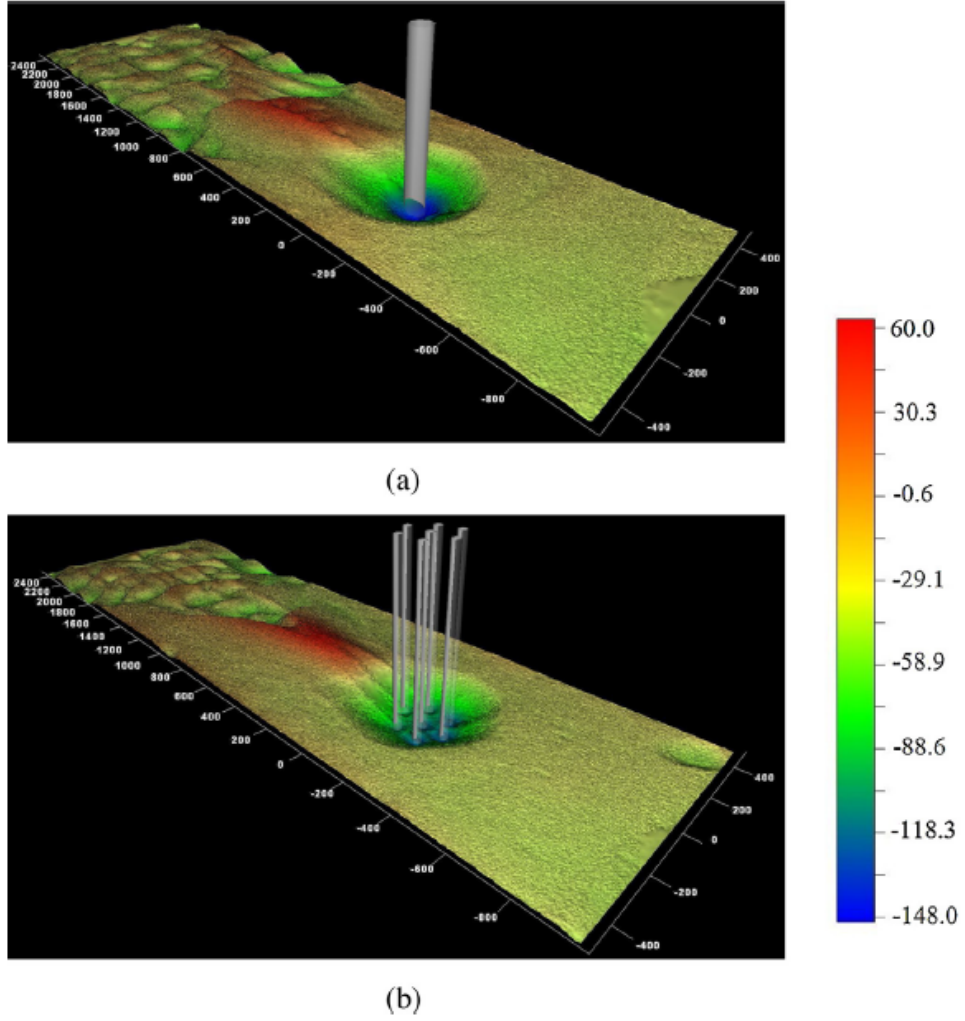
Mikrokazık grupları, erişim kısıtlı şantiyelerde veya üstyapı yüklerinin daha çok sayıda küçük çaplı elemanla zemine yayılması istenen durumlarda pratik bir alternatif olarak gündeme gelmektedir. Abd Elaziz ve El Naggar (2014), kohezyonlu zeminde hollow-bar mikrokazıkların tekil ve grup davranışını tam ölçek yükleme testleri ve sayısal analizlerle inceleyerek, grup rijitliği ve taşıma kapasitesinin başlık koşulları ve grup etkileşimi ile anlamlı biçimde değişebildiğini göstermiştir. Bu sonuçlar, mikrokazık gruplarında kapasite ölçeklemesinin (n katı yaklaşımı) her zaman konservatif veya gerçekçi olmayabileceğini, grup etkileşiminin tasarımda açıkça dikkate alınması gerektiğini işaret etmektedir (Abd Elaziz & El Naggar, 2014).

Türkiye bağlamında kıyı ve liman yapıları için maliyet hesabında kamu birim fiyatlarının kullanımı yaygındır. Bu çerçevede AYGM tarafından yayımlanan kıyı ve liman yapıları birim fiyat/poz tarifleri, temel ve imalat kalemlerinin parasal karşılığını izlenebilir şekilde tanımlamaktadır (T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı Altyapı

Yatırımları Genel Müdürlüğü (AYGM), 2025). Ancak literatürde, rekreatif amaçlı kazıklı iskeleler için tekil kazık ve çoklu kazık grubu alternatiflerini, aynı düşey talep seviyesinde ve AYGM birim fiyat sistemine dayalı biçimde sistematik olarak karşılaştıran senaryo temelli akademik çerçeveler sınırlı sayıdadır.

Bu tez, rekreatif amaçlı iskele kazığı için kohezyonsuz zeminlerde düşey taşıma gücü temelli uygunluk koşulunu sağlayan tekil kazık ve çoklu kazık grubu alternatiflerini, kamu birim fiyatlarına dayalı izlenebilir maliyet hesabı ile birlikte senaryo temelli olarak karşılaştırmayı hedeflemektedir. Çalışmanın yaklaşımı, eşdeğer bir hedef korunurken (performans/uygunluk kriteri sabitlenerek) geometrik düzenin değiştirilmesinin sistem tepkisini anlamlı biçimde farklılaştırabildiğini gösteren literatürdeki fikirlerden esinlenmiştir. Bu çerçevede Yağcı, Yıldırım, Çelik, Kitsikoudis, Duran, and Kırca (2017), eşdeğer alan yaklaşımı altında tekil bir silindir yerine çoklu silindir dizilerinin seçilmesinin oyulma birikim desenlerini ve maksimum oyulmayı değiştirebildiğini deneysel olarak göstermiştir. Bu çalışma, eşdeğerlik fikrinin mühendislikte alternatif düzenlerin kıyaslanmasına nasıl taşınabileceğine ilişkin güçlü bir örnek sunmaktadır.

Şekil 2.2 bu bakış açısını görsel olarak özetlemektedir: eşdeğerlik hedefi korunmasına rağmen (eşdeğer katı hacim/alan), tekil eleman ile dizi konfigürasyonunun oluşturduğu yerel etkileşimler sonuç desenini belirgin biçimde değiştirebilmektedir (Yağcı, Yıldırım, Çelik, Kitsikoudis, Duran, & Kırca, 2017). Bu tezde de benzer bir düşünceyle, tekil bir kazığın sağladığı düşey taşıma gücü hedefi (geoteknik ön yeterlilik) korunarak farklı çap/adet/düzen parametrelerine sahip çoklu kazık grupları alternatif bir karar uzayı olarak tanımlanmıştır.



Şekil 2.2: Tekil silindir ve eşdeğer katı hacme sahip sonlu silindir dizisinin oyulma–birikim desenlerinin karşılaştırılması: (a) 9 cm çaplı referans silindir, (b) düzenli yerleşimli altıgen silindir dizisi ($D=24$ cm, $\phi = 0.14$). Yatay uzaklıklar ve renk ölçeği mm cinsindedir (Yağcı, Yıldırım, Çelik, Kitsikoudis, Duran, & Kırca, 2017).

Bu yönüyle çalışma, (i) geoteknik ön yeterlilik (düşey taşıma gücü), (ii) alternatiflerin ayrık bir senaryo kümesi olarak tanımlanması, (iii) AYGM birim fiyat sistemine dayalı maliyetlendirme ve (iv) sonuçların karar destek niteliğinde karşılaştırılması bileşenlerini aynı çerçevede birleştirmektedir. Böylece zemin koşullarına bağlı kazık düzeni seçimi ve maliyet duyarlı tasarım kararlarında kullanılabilecek güvenli ve ekonomik bir değerlendirme yaklaşımı sunulması hedeflenmektedir.



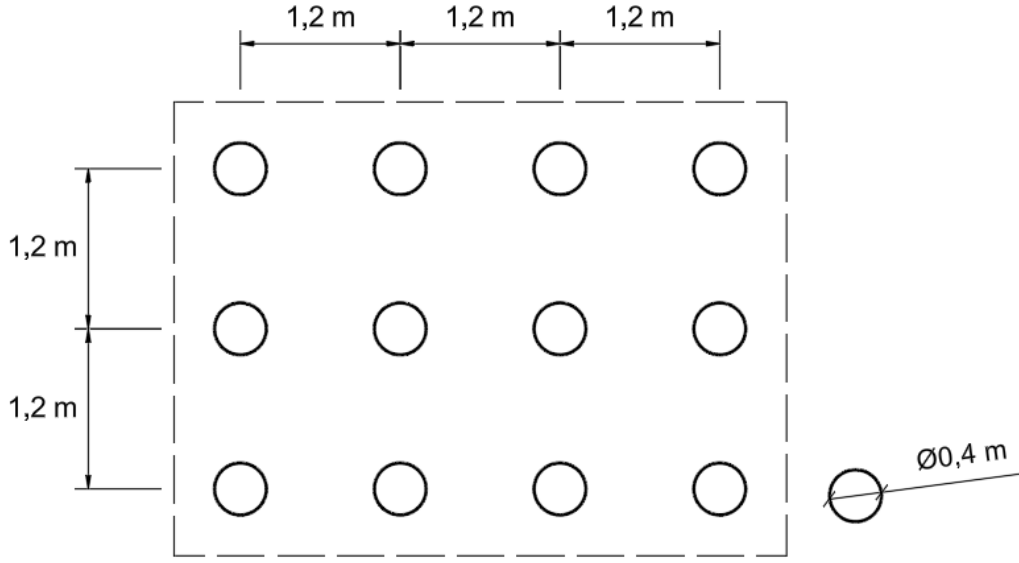
3. YÖNTEM VE ANALİTİK ÇERÇEVE

Bu bölümde, tekil kazıklara alternatif olarak kullanılan çoklu kazık gruplarının farklı zemin tipleri altında taşıma gücü, oturma ve maliyet açısından karşılaştırılmasına yönelik olarak izlenen yöntem açıklanmaktadır. Öncelikle referans kazıklı iskele sistemi ve idealize edilen zemin profilleri tanımlanmakta, ardından tekil kazık ve kazık grupları için kullanılan analitik hesap bağıntıları özetlenmekte ve son olarak maliyet hesabı ile senaryo kurgusu sunulmaktadır.

3.1 Referans Kazıklı İskele Sistemi

Bu bölümde rekreatif amaçlı iskele taşıyıcı sistemi için seçilen referans kazık düzenine ait düşey taşıma gücü hesapları sunulmaktadır. Referans senaryo gevşek kum zemine çakılmış 12 adet 0.4 m (16") çaplı çelik boru sürtünme kazığı üzerinden tanımlanmakta ve Kumbasar tarafından önerilen bağıntılar esas alınmaktadır (Kumbasar & Kip, 1999). Elde edilen sonuçlar ilerleyen bölümlerde çoklu kazık gruplarının boyutlandırılması ve maliyet analizlerinin gerçekleştirilmesinde referans olarak kullanılacaktır.

Referans sistemde her iskele aksında toplam 12 adet tekil kazık bulunmaktadır. Boyuna ve enine yönde eksenler arası açıklık 1,20 m alınmıştır. Bu yerleşim ile kazık grubunun plan boyutları $4,60 \times 3,40$ m olmaktadır. Kazık dış çapı $D = 0,40$ m (16") olarak seçilmiştir. Referans kazık grubunun plan görünüşü Şekil 3.1 içinde gösterilmektedir.



Şekil 3.1: Referans senaryonun plan görünüşü

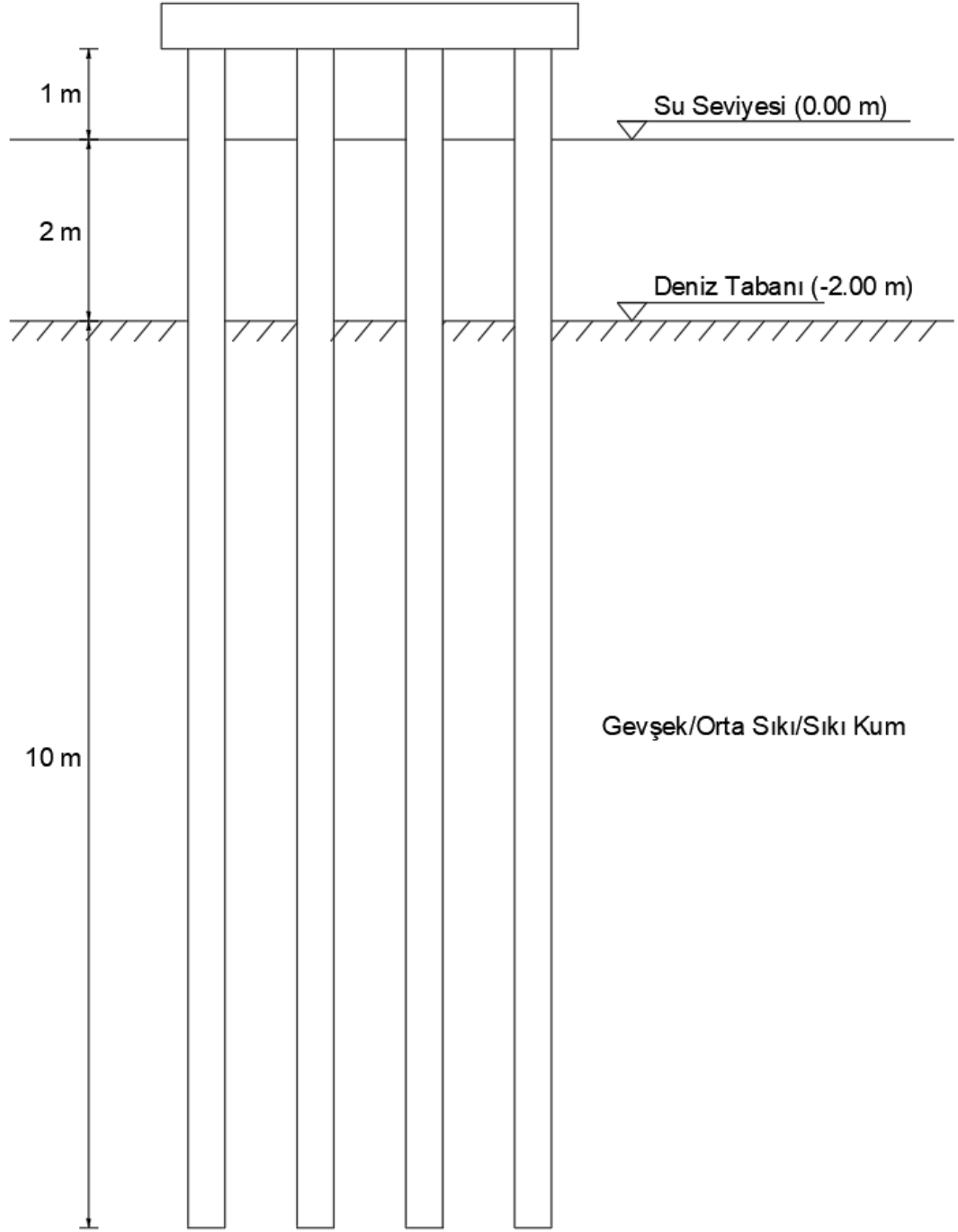
3.2 Referans Senaryo (Senaryo - 0) İçin Taşıma Gücü Hesaplamaları

Düşey doğrultuda su seviyesi $z = 0,00$ m ve deniz tabanı kotu $z = -2,00$ m alınmıştır. Kazıklar deniz tabanından itibaren homojen gevşek kum tabakası içerisine $L = 10,0$ m boyunda soketli kabul edilmiştir. Üst yapı kiriş ve döşeme sistemi rijit bir başlık olarak idealize edilmiştir. Referans kesit için yapılan bu idealizasyon Şekil 3.2 içinde verilmiştir.

Gevşek kum tabakası deniz suyu ile doymun kabul edilmiştir. Bu nedenle etkin birim hacim ağırlık, doymun kum için tipik değerler dikkate alınarak

$$\gamma' = 10 \text{ kN/m}^3 \quad (3.1)$$

şeklinde alınmıştır. Gevşek kum zemin için efektif içsel sürtünme açısı yaklaşık $\phi' = 30^\circ$ kabul edilmiştir (Kumbasar & Kip, 1999).



Şekil 3.2: Referans senaryoda kazıkların kesit görünüşü

Kumbasar kazık malzemesine bağlı olarak kazık çevresindeki sürtünme açısı δ ve yatay gerilme katsayısı K için Çizelge 3.1 içinde özetlenen değerleri önermektedir. Bu tabloda gevşek ve sıkı kum için iki farklı relatif sıkılık aralığı tanımlanmıştır.

Çizelge 3.1: Kazık malzemesine bağlı δ ve K değerleri (Kumbasar & Kip, 1999).

Kazık malzemesi	δ	K (küçük relatif sıkılık)	K (yüksek relatif sıkılık)
Çelik	20°	0,5	1,0
Beton	$0,75 \phi'$	1,0	2,0
Ahşap	$0,67 \phi'$	1,5	3,0

Zemin sıkılığı ile $K \tan \delta$ çarpımı arasındaki ilişki yine Kumbasar tarafından verilen Çizelge 3.2 içinde gösterilmiştir. Bu tabloda gevşek, orta sıkı ve sıkı kum için relatif sıkılık aralıkları ve çakma ile fore kazıklar için önerilen $K \tan \delta$ aralıkları yer almaktadır (Kumbasar & Kip, 1999).

Çizelge 3.2: Zeminin relatif sıkılığına bağlı önerilen $K \tan \delta$ aralıkları (Kumbasar & Kip, 1999).

Zeminin sıkılığı	Relatif sıkılık	$K \tan \delta$ (çakma kazık)	$K \tan \delta$ (fore kazık)
Gevşek	0,20–0,40	0,30–0,80	0,20–0,50
Orta	0,40–0,75	0,80–1,50	0,50–1,00
Sıkı	0,75–0,90	1,50–2,00	1,00–1,50

Bu çalışmada referans zemin gevşek kum olduğundan ve kazıklar çakma çelik kazık olarak tasarlandığından, Çizelge 3.2 içindeki gevşek kum ve çakma kazık satırı kullanılmıştır. Buna göre

$$K \tan \delta = 0,30 \text{ ile } 0,80 \quad (3.2)$$

aralığı geçerlidir. Hesaplarda bu aralığın ortalama değeri referans parametre olarak alınmış, alt ve üst sınırlar duyarlılık analizi için kullanılmıştır. Böylece

$$K \tan \delta = 0,55 \quad (3.3)$$

değeri referans kabul edilmiştir.

Kohezyonsuz zeminlerde tekil bir kazığın nihai düşey taşıma gücü genel olarak uç taşıma gücü ile sürtünme taşıma gücünün toplamı olarak ifade edilebilir. Buna göre

$$Q_u = Q_s + Q_p \quad (3.4)$$

şeklinde yazılır. Kohezyonsuz zeminlerde sürtünme kazığı taşıma gücü için Kumbasar tarafından verilen yaklaşımda birim çevre sürtünmesi

$$f_s(z) = K \sigma'_v(z) \tan \delta \quad (3.5)$$

şeklinde tanımlanmaktadır (Kumbasar & Kip, 1999). Burada K yatay gerilme katsayısı, $\sigma'_v(z)$ derinliğe bağlı efektif düşey gerilme ve δ kazık çevresi ile zemin arasındaki sürtünme açısıdır. Doygun kumda efektif düşey gerilme derinlik ile yaklaşık doğrusal değişmekte ve

$$\sigma'_v(z) = \gamma' z \quad (3.6)$$

olarak yazılmaktadır. Dairesel kesitli bir kazık için çevre uzunluğu

$$u = \pi D \quad (3.7)$$

şeklindedir. Buna göre kazığın L boyundaki toplam sürtünme taşıma gücü

$$Q_s = \int_0^L f_s(z) u dz = \pi D (K \tan \delta) \gamma' \int_0^L z dz = \frac{\pi}{2} D (K \tan \delta) \gamma' L^2 \quad (3.8)$$

şeklinde elde edilir.

Eşitlik (3.8) kullanılarak, gevşek kum içerisinde gömülü 0,40 m (16") çaplı çelik boru kazık için nihai sürtünme taşıma gücü

$$Q_s = \frac{\pi}{2} D (K \tan \delta) \gamma' L^2 = \frac{\pi}{2} \times 0,40 \times 0,55 \times 10 \times 10^2 = 345,6 \text{ kN} \quad (3.9)$$

olarak bulunur. Yöntemsel bütünlük açısından, kazık ucundaki taşıma gücü bileşeni de genel biçimiyle aşağıda verilmiştir. Kohezyonsuz zeminlerde uç taşıma gücü

$$Q_p = A_p q_d \quad (3.10)$$

bağıntısı ile tanımlanmakta olup, kazık ucu seviyesindeki nihai birim uç direnci

$$q_d = p_0 N_q \quad (3.11)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada p_0 kazık ucu seviyesindeki efektif düşey gerilme, N_q ise içsel sürtünme açısına bağlı taşıma gücü katsayısıdır. Homojen doymun kum tabakası için

$$p_0 = \gamma' L \quad (3.12)$$

yaklaşımı kullanılabilir.

İçi boş çelik boru kazıklarda kazık ucu alanı halkasal uç alanı olarak

$$A_{p,\text{çelik}} = \frac{\pi}{4} [D^2 - (D - 2t)^2] \quad (3.13)$$

şeklinde tanımlanırken, içi dolu ahşap kazıklarda kazık ucu alanı

$$A_{p,\text{ahşap}} = \frac{\pi}{4} D^2 \quad (3.14)$$

olarak yazılmaktadır. Bu tezde çelik ve ahşap kazıklar için uç taşıma gücü bileşeni teorik olarak bu bağıntılarla tanımlanabilmekle birlikte, her senaryo için ayrıca hesaba katılması karşılaştırmalı hesap çerçevesine ilave bir karmaşıklık getirmektedir. Bu nedenle uç taşıma gücü ana boyutlandırma hesabına dahil edilmemiş, ancak referans senaryo için mertebe kontrolü yapılmıştır. Referans senaryoda $\gamma' = 10 \text{ kN/m}^3$ ve $L = 10,0 \text{ m}$ olduğundan, kazık ucu seviyesindeki efektif düşey gerilme

$$p_0 = \gamma' L = 10 \times 10 = 100 \text{ kPa} \quad (3.15)$$

olarak elde edilir. Gevşek kum için kabul edilen $\phi' = 30^\circ$ değeri esas alındığında, taşıma gücü katsayısı yaklaşık

$$N_q = 18,4 \quad (3.16)$$

olarak alınmıştır (Das, 2010). Buna göre nihai birim uç direnci

$$q_d = p_0 N_q = 100 \times 18,4 = 1840 \text{ kPa} \quad (3.17)$$

olmaktadır. Referans kazık içi boş çelik boru kazık olduğundan, halkasal uç alanı

$$A_p = \frac{\pi}{4} [D^2 - (D - 2t)^2] = \frac{\pi}{4} [0,40^2 - (0,40 - 2 \times 0,01)^2] = 0,012252 \text{ m}^2 \quad (3.18)$$

şeklinde hesaplanır. Buna göre referans senaryo için uç taşıma gücü

$$Q_p = A_p q_d = 0,012252 \times 1840 = 22,5 \text{ kN} \quad (3.19)$$

olarak bulunur. Bu değer, Eşitlik (3.9) ile hesaplanan $Q_s = 345,6 \text{ kN}$ değeri ile karşılaştırıldığında

$$\frac{Q_p}{Q_s} = \frac{22,5}{345,6} = 0,065 \quad (3.20)$$

oranı elde edilir. Başka bir deyişle, referans senaryoda uç taşıma gücü bileşeni sürtünme taşıma gücünün yaklaşık %6,5'i mertebesinde dir.

Uç taşıma gücünün de hesaba katılması halinde tekil kazığın nihai taşıma gücü

$$Q_u = Q_s + Q_p = 345,6 + 22,5 = 368,1 \text{ kN} \quad (3.21)$$

olarak elde edilir. Buna karşılık bu tezde ana tasarım yaklaşımı, karşılaştırmalı analizlerin yalın ve tutarlı biçimde yürütülebilmesi amacıyla yalnızca çevre sürtünmesine dayalı taşıma mekanizması üzerinden sürdürülmüştür.

Nihai taşıma gücünden izin verilebilir taşıma gücüne geçişte Kumbasar tarafından önerilen güvenlik katsayısı aralıkları dikkate alınmış ve kohezyonsuz zeminlerde kazık taşıma gücü için

$$FS = 2,5 \quad (3.22)$$

değeri benimsenmiş (Kumbasar & Kip, 1999) ve tek bir kazığın izin verilebilir düşey taşıma gücü

$$Q_{all,tek} = \frac{Q_s}{FS} \quad (3.23)$$

şeklinde tanımlanmıştır. Buna göre referans senaryoda tek bir kazığın izin verilebilir düşey taşıma gücü

$$Q_{all,tek} = \frac{345,6}{2,5} = 138,2 \text{ kN} \quad (3.24)$$

olarak bulunur. İskeledeki kazıkların toplam izin verilebilir düşey taşıma gücü

$$Q_{all} = \eta_g n Q_{all,tek} \quad (3.25)$$

bağıntısı ile ifade edilmektedir. Bu çalışmada çakma kazıkların gevşek kumdaki davranışı için grup verim katsayısı

$$\eta_g = 1,0 \quad (3.26)$$

olarak kabul edilmiştir (Das, 2010; Kumbasar & Kip, 1999).

Referans senaryoda 12 adet kazık bulunduğuna göre, toplam izin verilebilir düşey taşıma gücü

$$Q_{all} = 12 Q_{all,tek} = 12 \times 138,2 = 1659 \text{ kN} \quad (3.27)$$

şeklinde elde edilir.

Bu çalışmada ele alınacak senaryolarda izin verilebilir taşıma gücü olarak $Q_{all} = 1659 \text{ kN}$ değeri esas alınacaktır.

3.3 Senaryo 1: Gevşek Kumda 0,10 m (4") Çaplı Grup Kazık Düzeni

Bu senaryoda referans sistemde kullanılan her bir 0,40 m (16") çaplı tekil çelik kazık, aynı alanı kaplayan bir grup kazık düzeni ile değiştirilmiştir.

Senaryo 1 için plan yerleşimi Şekil 3.3 içinde gösterilmiştir. Referans senaryoda her iskele aksında bulunan 0,40 m (16") çaplı tekil kazıkların konumları korunmuştur.

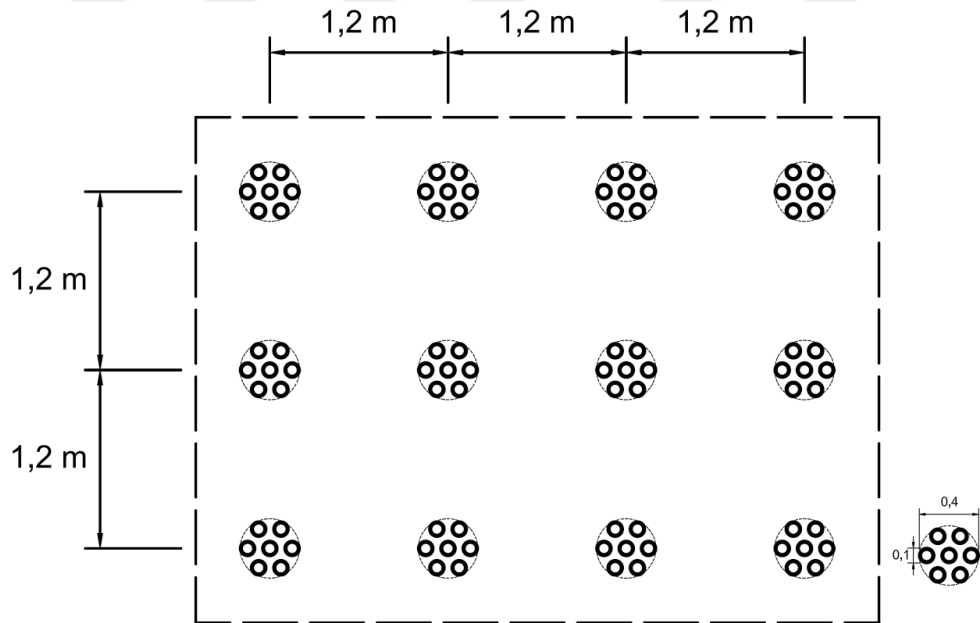
Ancak her konumda tek kazık yerine, 0,40 m (16") çaplı bir daire içinde düzenlenmiş 7 adet 0,10 m (4") çaplı çelik boru kazık kullanılmıştır. Böylece üst yapı sisteminin plan geometrisi ve aks aralıkları değişmeden kalmakta, yalnızca kazık kesit düzeni değişmektedir.

Mikro grup içindeki yerleşim Şekil 3.4 içinde ayrıntılı olarak gösterilmiştir. Dıştaki daire 0,40 m (16") çapında olup referans senaryodaki tekil kazığın dış çapını temsil etmektedir. Bu dairenin içinde biri merkezde, altısı çevrede olmak üzere toplam 7 adet 0,10 m (4") çaplı kazık yerleştirilmiştir.

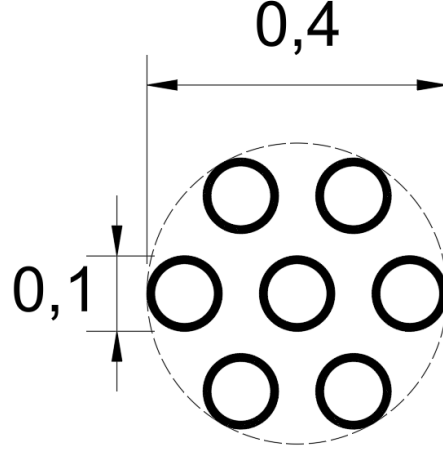
Kazık merkezleri arasındaki açıklık yaklaşık olarak $d = 0,15\text{ m}$ ve kazık çapı $D = 0,10\text{ m}$ olduğundan, aralık oranı

$$\frac{d}{D} = \frac{0,15}{0,10} = 1,5 \quad (3.28)$$

olarak ifade edilebilir. Bu değer, mikro grubun gevşek kum zemin içinde çok sık bir kazık grubu olarak değerlendirilmesine neden olmaktadır (Das, 2010).



Şekil 3.3: Senaryo 1 için 0,10 m (4") çaplı grup kazıklardan oluşan kazık grubunun plan görünüşü



Şekil 3.4: Senaryo 1 için 0,40 m (16") dairesi içinde düzenlenmiş 7 adet 0,10 m (4") çaplı çelik kazıktan oluşan mikro grup yerleşimi

Düşey doğrultuda su seviyesi, deniz tabanı kotu ve zemin profili referans senaryo ile aynıdır. Kazıklar yine deniz tabanından itibaren gevşek kum tabakası içine çakılmaktadır. Kazık boyu bu kez tasarım değişkeni olarak ele alınmakta ve Senaryo 1 için gerekli gömülme boyu, referans senaryoda elde edilen taşıma gücü ile eşdeğerlik şartı üzerinden belirlenmektedir.

3.3.1 Tekil 0,10 m (4") kazık için taşıma gücü ifadesi

Gevşek kum zemin ve çakma çelik kazık koşullarında, çevre sürtünmesine bağlı nihai düşey taşıma gücü Bölüm 3.2 içinde verilen

$$Q_s = \frac{\pi}{2} D (K \tan \delta) \gamma' L^2 \quad (3.29)$$

ifadesi ile hesaplanmaktadır (Kumbasar & Kip, 1999). Burada D kazık çapı, L deniz tabanından itibaren gömülme boyu, γ' etkin birim hacim ağırlık ve $K \tan \delta$ ise Kumbasar tarafından gevşek kum ve çakma çelik kazık için önerilen katsayıdır. Referans senaryoda olduğu gibi $\gamma' = 10 \text{ kN/m}^3$ ve $K \tan \delta = 0,55$ değerleri kullanılmaktadır (Kumbasar & Kip, 1999). Kazık çapı Senaryo 1 için 0,10 m (4") olduğundan, tekil 0,10 m (4") kazığın nihai çevre sürtünmesine dayalı taşıma gücü

$$Q_s = \frac{\pi}{2} \cdot 0,10 \cdot 0,55 \cdot 10 \cdot L^2 = 0,86 L^2 \text{ kN} \quad (3.30)$$

şeklinde yazılabilir. Güvenlik katsayısı referans senaryoda olduğu gibi $FS = 2,5$ alınmıştır. Buna göre tek bir 0,10 m (4") kazığın izin verilebilir düşey taşıma gücü

$$Q_{all} = \frac{Q_s}{FS} = 0,3456 L^2 \text{ kN} \quad (3.31)$$

olarak elde edilir.

3.3.2 Mikro grup verim katsayısı ve eşdeğerlik şartı

Kazık gruplarında düşey taşıma gücü, Das tarafından aşağıdaki şekilde tanımlanan grup verim katsayısı yardımı ile ifade edilmektedir (Das, 2010):

$$\eta_g = \frac{Q_{g(u)}}{n Q_u} \quad (3.32)$$

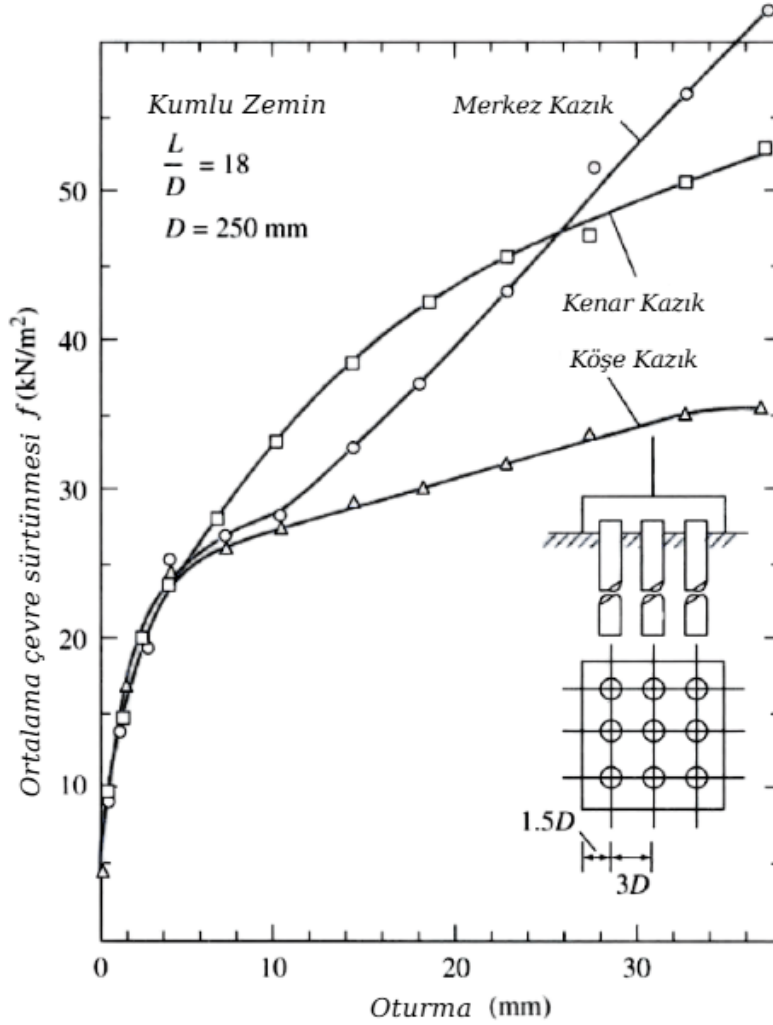
Burada $Q_{g(u)}$ grup kazığın nihai düşey taşıma gücü, Q_u ise grup etkisi olmaksızın tekil bir kazığın nihai taşıma gücüdür ve n grup içindeki kazık sayısını göstermektedir. Sürtünme kazıklarından oluşan gruplar için literatürde çeşitli basitleştirilmiş bağıntılar önerilmiştir. Bu bağıntılar Çizelge 3.3 içinde verilmekte olup, grup verim katsayısını kazık sayısı ve aralık oranına bağlı olarak ifade etmektedir (Converse–Labarre, Los Angeles Group Action ve Seiler–Keeney bağıntıları).

Çizelge 3.3: Sürtünme kazıkları için grup verim katsayısı bağıntıları (Das, 2010, Tablo 11.17).

İsim	Bağıntı
Converse–Labarre denklemi	$\eta = 1 - \left[\frac{(n_1 - 1)n_2 + (n_2 - 1)n_1}{90n_1n_2} \right] \theta$ $\theta \text{ (deg)} = \tan^{-1} \left(\frac{D}{d} \right)$
Los Angeles Group Action denklemi	$\eta = 1 - \frac{D}{\pi d n_1 n_2} \left[n_1(n_2 - 1) + n_2(n_1 - 1) + \sqrt{2(n_1 - 1)(n_2 - 1)} \right]$
Seiler–Keeney denklemi (Seiler ve Keeney, 1944)	$\eta = \left\{ 1 - \frac{11d}{7(d^2 - 1)} \left[\frac{n_1 + n_2 - 2}{n_1 + n_2 - 1} \right] \right\} + \frac{0,3}{n_1 + n_2}$ $d \text{ ft cinsindendir.}$

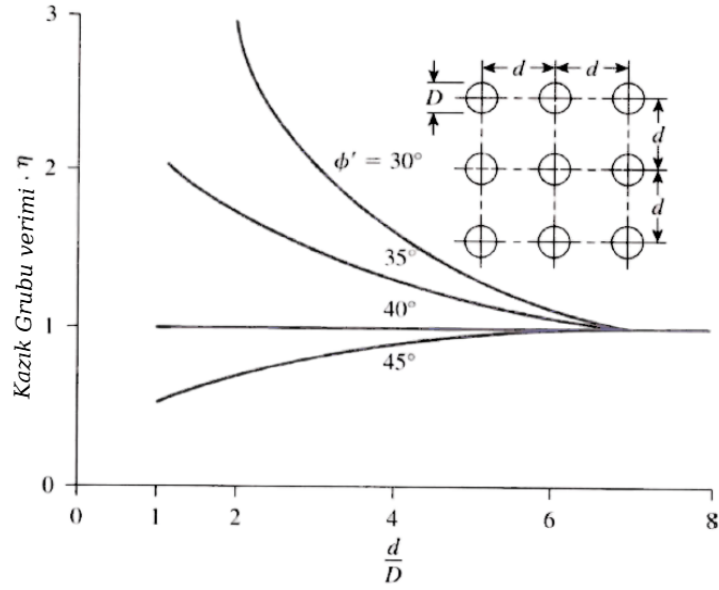
Das, söz konusu bağıntıların özellikle kum zeminlerdeki çakma kazık grupları için oldukça basitleştirilmiş olduğunu ve grup içindeki her kazık için birim çevre sürtünmesinin konuma göre değiştiğini vurgulamaktadır. Şekil 3.5 kumlu zeminde köşe, kenar ve merkez kazıkların oturma ile ortalama çevre sürtünmesi f değerlerinin nasıl farklılaştığını göstermekte olup, merkez kazıkların çevre sürtünmesinin kenar ve

köşe kazıklara göre belirgin biçimde daha yüksek olduğunu ortaya koymaktadır (Das, 2010).



Şekil 3.5: Kum zeminde kazık grubu içinde köşe, kenar ve merkez kazıkların oturma ile ortalama çevre sürtünmesi f arasındaki ilişki ve grup içi konuma bağlı sürtünme dağılımı (Das, 2010, Şekil 11.38).

Bu nedenle kum zeminlerde grup davranışının değerlendirilmesinde, Kishida ve Meyerhof tarafından geliştirilen ve Das tarafından verilen deneysel grup verim eğrilerinin daha uygun olduğu belirtilmektedir (Das, 2010). Şekil 3.6 kum zeminlerde kazık grubu veriminin, aralık oranı d/D ve içsel sürtünme açısına ϕ' bağlı değişimini göstermektedir.



Şekil 3.6: Kum zeminlerde kazık grubu veriminin η_g , aralık oranı d/D ve içsel sürtünme açısı ϕ' ile değişimi (Kishida ve Meyerhof, 1965 verilerinden, (Das, 2010, Şekil 11.39)).

Şekil 3.6'da gevşek ve orta sıkı kumlar için içsel sürtünme açısına bağlı olarak η_g-d/D ilişkisi sunulmaktadır. Gevşek kum koşulları için $\phi' = 30^\circ-35^\circ$ aralığı temsil edici kabul edilirse ve Senaryo 1'deki mikro grup için $d/D = 1,5$ oranı kullanılırsa, ilgili eğrilerden grup verim katsayısının

$$\eta \gtrsim 1,3-2,0 \quad (3.33)$$

aralığında olduğu görülmektedir. Bu durum, gevşek kumda çakma kazıklardan oluşan sık gruplar için yapılan deneysel çalışmaların, tekil kazıkların toplamına göre daha yüksek bir grup taşıma kapasitesi (zemin sıkılaşması etkisi) ortaya koyduğunu göstermektedir.

Bununla birlikte, tasarım pratiğinde grup verim katsayısının 1'den büyük değerlerinin doğrudan kullanılmaması ve grup taşıma gücünün en fazla tekil kazıkların toplamı ile sınırlandırılması önerilmektedir. Das, Eq. (11.120) sonrasında, $\eta_g > 1$ olması durumunda grup kapasitesinin $Q_{g(u)} = n Q_u$ olarak alınması gerektiğini belirtmektedir (Das, 2010).

Bu çalışma kapsamında da güvenli tarafta kalmak amacıyla mikro grup için grup verim katsayısı $\eta_{\text{mikro}} = 1,0$ olarak benimsenmiştir.

3.3.3 Gerekli gömülme boyunun belirlenmesi (Senaryo 1)

Gerekli zemin içerisine gömülme boyu belirlenirken her 0,40 m (16") dairesi içinde 7 adet 0,10 m (4") kazık bulunmaktadır. Buna göre bir mikro grubun izin verilebilir düşey taşıma gücü

$$Q_{\text{all}} = \eta_{\text{mikro}} n Q_{\text{all,tek}} = 1,0 \times 7 \times 0,3456 L^2 = 2,42 L^2 \text{ kN} \quad (3.34)$$

şeklinde yazılabilir. Referans senaryo için tek bir 0,40 m (16") kazığın izin verilebilir taşıma gücü Bölüm 3.2 içinde yaklaşık $Q_{\text{all,tek,ref}} = 138,2 \text{ kN}$ olarak elde edilmiştir. Senaryo 1 kapsamında her mikro grubun, referans senaryodaki tekil 0,40 m (16") kazığın sağladığı kapasiteyi karşılaması istenmektedir. Bu eşdeğerlik şartı $Q_{\text{all,grup}} = 138,2 \text{ kN}$ şeklinde yazılabilir. Eşitlik (3.34) ile birlikte çözüldüğünde gerekli gömülme boyu

$$2,42 L^2 = 138,2 \Rightarrow L^2 = 57,1 \Rightarrow L = 7,6 \text{ m} \quad (3.35)$$

olarak bulunur. Buna göre 0,10 m (4") çaplı kazıkların deniz tabanından itibaren yaklaşık 7,6 m gömülmesi durumunda, her bir mikro grup referans senaryodaki tek bir 0,40 m (16") kazık ile aynı mertebede izin verilebilir düşey taşıma gücü sağlamaktadır.

İskele altında referans senaryoda 12 adet tekil 0,40 m (16") kazık bulunmaktadır ve toplam izin verilebilir düşey taşıma gücü $Q_{\text{all}} = 1659 \text{ kN}$ olarak tanımlanmıştır. Senaryo 1 düzeninde ise her konumda 7 adet 0,10 m (4") kazıktan oluşan bir mikro grup bulunmaktadır.

Kazık sayısı bakımından, referans sistemde 12 adet kazık bulunurken her grupta 7 adet mikro kazık yer almakta ve toplam mikro kazık sayısı 84 olmaktadır. Tek bir mikro grup için Eşitlik (3.34) ve gömülme boyu (3.35) kullanıldığında

$$Q_{\text{all,grup}} = 138,2 \text{ kN} \quad (3.36)$$

elde edilir. Bu değer, referans senaryodaki tek bir 0,40 m (16") kazığın taşıma gücü ile aynıdır. Dolayısıyla Senaryo 1 için iskele ayağı altındaki toplam izin verilebilir düşey taşıma gücü

$$Q_{all} = 12 Q_{all,grup} = 12 \times 138,2 = 1659 \text{ kN} \quad (3.37)$$

şeklinde bulunur. Bu sonuç Senaryo 1 düzeninin, gevşek kumda çakma sürtünme kazıklarına ilişkin grup verim katsayısı yaklaşımı ile birlikte, düşey taşıma gücü açısından referans kazık grubuna eşdeğer olduğunu göstermektedir. İlerleyen bölümlerde bu iki düzenek resmi birim fiyatlar üzerinden maliyet ve yapım kolaylığı yönlerinden karşılaştırılacaktır.

3.4 Senaryo 2: Orta Sıkı Kumda 0,40 m (16") Çaplı Tekil Kazık Düzeni

Bu senaryoda iskele ayağı altındaki kazık düzeni, referans senaryodaki ile aynıdır. Yani her aks altında 0,40 m (16") çaplı çakma çelik kazıklardan oluşan 3×4 düzeni korunmakta, yalnızca zemin koşulları gevşek kum yerine orta sıkı kum olarak ele alınmaktadır. Üstyapıdan aktarılan tasarım düşey yükü ve iskele plan geometrisi değiştirilmemekte, zemin özelliklerindeki iyileşmeye bağlı olarak gerekli kazık gömülme boyunun azalması beklenmektedir.

3.4.1 Gerekli gömülme boyunun belirlenmesi (Senaryo 2)

Orta sıkı kum zemin ve çakma çelik kazık koşullarında, çevre sürtünmesine bağlı nihai düşey taşıma gücü yine Eşitlik (3.8) ile hesaplanmaktadır. Kumbasar ve Kip tarafından orta sıkı kum için çakma çelik kazıklarda önerilen parametreler dikkate alınarak $K \tan \delta = 0,75$ ve $\gamma' = 10 \text{ kN/m}^3$ değerleri benimsenmiştir (Kumbasar & Kip, 1999). Kazık çapı Senaryo 2 için $D = 0,40 \text{ m}$ olduğundan, tekil 0,40 m çaplı kazığın nihai çevre sürtünmesine dayalı taşıma gücü

$$Q_s = \frac{\pi}{2} \cdot 0,40 \cdot 0,75 \cdot 10 \cdot L^2 = 4,71 L^2 \text{ kN} \quad (3.38)$$

şeklinde yazılabilir. Güvenlik katsayısı yine $FS = 2,5$ olarak alınmıştır. Buna göre tek bir 0,40 m (16") kazığın izin verilebilir düşey taşıma gücü

$$Q_{all,tek} = \frac{Q_s}{FS} = 1,88L^2 \text{ kN} \quad (3.39)$$

olarak elde edilir. Üstyapıdan kazık başına aktarılan tasarım yükü, gevşek kumdaki referans senaryo ile aynıdır. Referans senaryoda tek bir 0,40 m kazığın izin verilebilir taşıma gücü yaklaşık $Q_{all,tek} = 138,2 \text{ kN}$ olarak tanımlanmıştır (bkz. Bölüm 3.2). Orta sıkı kum durumunda da aynı tasarım yükünü karşılayacak en küçük gömülme boyunu bulmak amacıyla, Senaryo 2 için eşdeğerlik şartı $Q_{all,tek} = 138,2 \text{ kN}$ şeklinde yazılabilir. Eşitlik (3.39) ile birlikte çözüldüğünde

$$1,88L^2 = 138,2 \Rightarrow L^2 = 73,5 \Rightarrow L = 8,6 \text{ m} \quad (3.40)$$

bulunur. Yani orta sıkı kumda 0,40 m çaplı kazıkların deniz tabanından itibaren yaklaşık 8,6 m gömülmesi, kazık başına 138,2 kN mertebesinde izin verilebilir taşıma gücü sağlamaktadır.

İskele ayağı altında referans düzen yine 12 adet tekil 0,40 m kazıktan oluşmaktadır. Grup verim katsayısı gevşek kum durumunda tartışıldığı üzere tasarımda $\eta_g = 1,0$ ile sınırlandırılmıştır.

Buna göre Senaryo 2 için iskele ayağı altındaki toplam izin verilebilir düşey taşıma gücü

$$Q_{all} = 12 Q_{all,tek} = 12 \times 138,2 = 1659 \text{ kN} \quad (3.41)$$

olmakta, yani orta sıkı kum için tasarlanan tekil kazık düzeni, gevşek kumdaki referans kazık grubuyla aynı mertebede taşıma gücünü daha kısa kazıklarla sağlamaktadır.

3.5 Senaryo 3: Orta Sıkı Kumda 0,10 m (4") Çaplı Grup Kazık Düzeni

Senaryo 3, Senaryo 1 ile aynı geometrik kurguyu orta sıkı kum zemin koşulları altında incelemektedir. Her bir 0,40 m (16") çaplı tekil kazık konumu yerinde bırakılmakta, ancak bu konumlarda 0,40 m çaplı daire içerisine yerleştirilmiş 7 adet 0,10 m (4") çaplı çakma çelik kazıktan oluşan mikro gruplar kullanılmaktadır. Böylece Senaryo

1'deki gevşek kum durumu ile, Senaryo 3'teki orta sıkı kum durumu doğrudan karşılaştırılabilmektedir.

3.5.1 Gerekli gömülme boyunun belirlenmesi (Senaryo 3)

Orta sıkı kumda 0,10 m çaplı çakma çelik kazık için çevre sürtünmesine bağlı nihai düşey taşıma gücü, yine Eşitlik (3.8) yardımıyla ve $D = 0,10\text{m}$ alınarak hesaplanır. Güvenlik katsayısı yine $FS = 2,5$ olup, tek bir 0,10 m kazığın izin verilebilir düşey taşıma gücü

$$Q_{\text{all,tek}} = \frac{Q_s}{FS} = 0,47L^2 \text{ kN} \quad (3.42)$$

olarak elde edilir. Her 0,40 m dairesi içinde yine 7 adet 0,10 m kazık bulunmaktadır. Kazıklar arası açıklıklar Senaryo 1 ile aynı olup ortalama kazık aralığı $d/D = 1,5$ mertebesinde. Şekil 3.6'dan orta sıkı kum koşulları için $\phi' = 35^\circ - 40^\circ$ aralığı dikkate alındığında, teorik grup verim katsayısının $d/D = 1,5$ için yaklaşık $\eta_{\text{mikro, teorik}} \approx 1,0 - 1,3$ aralığında olduğu görülmektedir.

Ancak tasarım pratiğinde $\eta_g > 1$ değerlerinin doğrudan kullanılmaması ve grup taşıma gücünün tekil kazıkların toplamı ile sınırlandırılması önerildiğinden, bu çalışma orta sıkı kum için de mikro grup için grup verim katsayısı $\eta_{\text{mikro}} = 1,0$ olarak benimsenmiştir.

Buna göre orta sıkı kumda bir mikro grubun izin verilebilir düşey taşıma gücü

$$Q_{\text{all}} = \eta_{\text{mikro}} n Q_{\text{all,tek}} = 1,0 \times 7 \times 0,47L^2 = 3,30L^2 \text{ kN} \quad (3.43)$$

şeklinde ifade edilebilir. Referans senaryoda tek bir 0,40 m kazığın izin verilebilir taşıma gücü yeniden $Q_{\text{all,tek}} = 138,2\text{kN}$ olarak alındığında, Senaryo 3 kapsamında her mikro grubun bu kapasiteyi karşılaması istenmektedir. Eşdeğerlik şartı $Q_{\text{all,grup}} = 138,2 \text{ kN}$ şeklinde yazılabilir. Eşitlik (3.43) ile birlikte çözüldüğünde

$$3,30L^2 = 138,2 \Rightarrow L^2 = 41,9 \Rightarrow L = 6,5 \text{ m} \quad (3.44)$$

elde edilir. Buna göre 0,10 m çaplı kazıkların deniz tabanından itibaren yaklaşık 6,5 m gömülmesi durumunda, her bir mikro grup referans senaryodaki tek bir 0,40 m kazık ile aynı mertebede izin verilebilir düşey taşıma gücü sağlamaktadır.

İskele ayağı altında 12 adet mikro grup bulunduğundan, Senaryo 3 için toplam izin verilebilir düşey taşıma gücü

$$Q_{all} = 12 Q_{all,grup} = 12 \times 138,2 = 1659 \text{ kN} \quad (3.45)$$

şeklinde bulunur. Böylece orta sıkı kumdaki grup kazık düzeni, gevşek kumdaki referans kazık grubuyla aynı mertebede taşıma gücünü, daha kısa ve daha fazla sayıda kazık kullanarak sağlamaktadır. Bu dört senaryo arasındaki ayrıntılı maliyet karşılaştırması ilerleyen bölümlerde ele alınacaktır.

3.6 Senaryo 4: Sıkı Kumda 0,40 m (16") Çaplı Tekil Kazık Düzeni

Bu senaryoda iskele altındaki kazık düzeni, referans senaryoda olduğu gibi 0,40 m (16") çaplı çakma çelik kazıklardan oluşan 3×4 tekil kazık grubu olarak korunmaktadır. Farklı olarak zemin koşulları sıkı kum sınıfında ele alınmakta, dolayısıyla çevre sürtünmesine bağlı taşıma gücünün artması ve gerekli gömülme boyunun azalması beklenmektedir. Üstyapıdan aktarılan tasarım düşey yükü ve iskele plan geometrisi değiştirilmemektedir.

3.6.1 Gerekli gömülme boyunun belirlenmesi (Senaryo 4)

Sıkı kum zemin ve çakma çelik kazık koşullarında, çevre sürtünmesine bağlı nihai düşey taşıma gücü yine Eşitlik (3.8) ile hesaplanmaktadır. Kumbasar ve Kip tarafından sıkı kum için çakma çelik kazıklarda önerilen parametreler dikkate alınarak $K \tan \delta = 1,00$, $\gamma' = 10 \text{ kN/m}^3$ değerleri benimsenmiştir (Kumbasar & Kip, 1999). Kazık çapı Senaryo 4 için $D = 0,40 \text{ m}$ olduğundan, tekil 0,40 m çaplı kazığın nihai çevre sürtünmesine dayalı taşıma gücü

$$Q_s = \frac{\pi}{2} \cdot 0,40 \cdot 1,00 \cdot 10 \cdot L^2 = 6,28 L^2 \text{ kN} \quad (3.46)$$

şeklinde yazılabilir. Güvenlik katsayısı yine $FS = 2,5$ olarak alınmıştır. Buna göre tek bir 0,40 m (16") kazığın izin verilebilir düşey taşıma gücü

$$Q_{all,tek} = \frac{Q_s}{FS} = 2,51 L^2 \text{ kN} \quad (3.47)$$

olarak elde edilir. Üstyapıdan kazık başına aktarılan tasarım yükü, gevşek kumdaki referans senaryo ile aynıdır. Referans senaryoda tek bir 0,40 m kazığın izin verilebilir taşıma gücü $Q_{all,tek} = 138,2 \text{ kN}$ olarak tanımlanmıştır (bkz. Bölüm 3.2). Sıkı kum durumunda da aynı tasarım yükünü karşılayacak en küçük gömülme boyunu bulmak amacıyla, Senaryo 4 için eşdeğerlik şartı $Q_{all,tek} = 138,2 \text{ kN}$ şeklinde yazılabilir. Eşitlik (3.47) ile birlikte çözüldüğünde

$$2,51 L^2 = 138,2 \Rightarrow L^2 = 55,0 \Rightarrow L = 7,4 \text{ m} \quad (3.48)$$

bulunur. Yani sıkı kumda 0,40 m çaplı kazıkların deniz tabanından itibaren yaklaşık 7,4 m gömülmesi, kazık başına 138,2 kN mertebesinde izin verilebilir taşıma gücü sağlamaktadır.

İskele ayağı altında referans düzen yine 12 adet tekil 0,40 m kazıktan oluşmaktadır. Grup verim katsayısı, gevşek ve orta sıkı kum durumlarında tartışıldığı üzere tasarımda $\eta_g = 1,0$ ile sınırlandırılmıştır.

Buna göre Senaryo 4 için iskele ayağı altındaki toplam izin verilebilir düşey taşıma gücü

$$Q_{all} = 12 Q_{all,tek} = 12 \times 138,2 = 1659 \text{ kN} \quad (3.49)$$

olmakta, yani sıkı kum için tasarlanan tekil kazık düzeni, gevşek ve orta sıkı kum senaryolarında olduğu gibi, referans kazık grubuyla aynı mertebede taşıma gücünü daha kısa kazık boyları ile sağlamaktadır.

3.7 Senaryo 5: Sıkı Kumda 0,10 m (4") Çaplı Grup Kazık Düzeni

Senaryo 5, geometrik olarak Senaryo 1 ve Senaryo 3 ile aynı grup kazık düzenini sıkı kum zemin koşulları altında incelemektedir. Her bir 0,40 m (16") çaplı tekil kazık konumunda, 0,40 m çaplı daire içine yerleştirilmiş 7 adet 0,10 m (4") çaplı çakma çelik kazıktan oluşan mikro grup kullanılmaktadır. Böylece gevşek, orta sıkı ve sıkı kum koşulları altında aynı grup geometrisinin performansı doğrudan karşılaştırılabilmektedir.

3.7.1 Gerekli gömülme boyunun belirlenmesi (Senaryo 5)

Sıkı kumda 0,10 m çaplı çakma çelik kazık için çevre sürtünmesine bağlı nihai düşey taşıma gücü, Eşitlik (3.50) kullanılarak ve $D = 0,10$ m alınarak

$$Q_s = \frac{\pi}{2} \cdot 0,10 \cdot 1,00 \cdot 10 \cdot L^2 = 1,57 L^2 \text{ kN} \quad (3.50)$$

şeklinde yazılabilir. Güvenlik katsayısı $FS = 2,5$ olarak alındığında, tek bir 0,10 m kazığın izin verilebilir düşey taşıma gücü

$$Q_{\text{all,tek}} = \frac{Q_s}{FS} = 0,63 L^2 \text{ kN} \quad (3.51)$$

olarak elde edilir. Her 0,40 m dairesi içinde yine 7 adet 0,10 m kazık bulunduğundan, mikro grup için kazık sayısı 7 adet olmaktadır. Kazıklar arası açıklıklar Senaryo 1 ve 3 ile aynıdır ve ortalama kazık aralığı $d/D = 1,5$ mertebesinde.

Şekil 3.6 incelendiğinde, sıkı kum koşullarını temsil eden $\phi' = 40^\circ - 45^\circ$ eğrileri için $d/D = 1,5$ bölgesinde grup verim katsayısının yaklaşık $\eta_g \approx 0,8 - 1,0$ aralığında seyrettiği görülmektedir. Tasarım pratiğinde güvenli tarafta kalmak ve aynı zamanda farklı senaryoların karşılaştırılmasını sadeleştirmek amacıyla, bu çalışmada sıkı kum için de mikro grup verim katsayısı $\eta_{\text{mikro}} = 1,0$ olarak benimsenmiştir.

$$Q_{\text{all,grup}} = \eta_{\text{mikro}} n Q_{\text{all,tek}} \Rightarrow 1,0 \times 7 \times 0,63 L^2 = 4,41 L^2 \text{ kN} \quad (3.52)$$

şeklinde ifade edilebilir. Senaryo 5'te de her mikro grubun, referans senaryodaki tek bir 0,40 m kazığın izin verilebilir taşıma gücünü sağlaması hedeflenmektedir.

Bu nedenle eşdeğerlik şartı $Q_{all,grup} = 138,2$ kN şeklinde yazılabilir. Eşitlik (3.52) ile birlikte çözüldüğünde

$$4,41 L^2 = 138,2 \Rightarrow L^2 = 31,3 \Rightarrow L = 5,6 \text{ m} \quad (3.53)$$

elde edilir. Buna göre 0,10 m çaplı kazıkların deniz tabanından itibaren yaklaşık 5,6 m gömülmesi durumunda, her bir mikro grup referans senaryodaki tek bir 0,40 m kazık ile aynı mertebede izin verilebilir düşey taşıma gücü sağlamaktadır.

İskele ayağı altında 12 adet mikro grup bulunduğundan, Senaryo 5 için toplam izin verilebilir düşey taşıma gücü

$$Q_{all} = 12 Q_{all,grup} = 12 \times 138,2 = 1659 \text{ kN} \quad (3.54)$$

şeklinde bulunur. Böylece sıkı kumdaki grup kazık düzeni, gevşek ve orta sıkı kum senaryolarında olduğu gibi, iskele ayağı altında aynı toplam taşıma kapasitesini daha kısa kazık boyları ile sağlayan bir alternatif olarak tanımlanmaktadır.

3.8 Senaryo 6: Gevşek Kumda 0,40 m (16") Çaplı Ahşap Tekil Kazık Düzeni

Bu senaryoda iskele ayağı altındaki tekil kazık düzeni, referans çelik kazık düzeni ile aynıdır. Farklı olarak kazık malzemesi içi dolu ahşap olarak alınmakta ve zemin gevşek kum sınıfında değerlendirilmektedir. Üstyapıdan kazık başına aktarılan tasarım yükü, referans senaryodaki ile aynı tutulmaktadır.

3.8.1 Gerekli gömülme boyunun belirlenmesi (Senaryo 6)

Gevşek kumda ahşap kazık için $K \tan \delta = 0,40$ ve $\gamma' = 10 \text{ kN/m}^3$ değerleri kullanılmaktadır. Genel ifade Eşitlik (3.29) kullanılarak, 0,40 m çaplı tekil ahşap kazığın nihai çevre sürtünmesine dayalı taşıma gücü

$$Q_s = \frac{\pi}{2} \cdot 0,40 \cdot 0,40 \cdot 10 \cdot L^2 = 2,51 L^2 \text{ kN} \quad (3.55)$$

şeklinde yazılabilir. Güvenlik katsayısı $FS = 2,5$ alındığında, tek bir 0,40 m çaplı ahşap kazığının izin verilebilir düşey taşıma gücü

$$Q_{all,tek} = \frac{Q_s}{FS} = 1,01 L^2 \text{ kN} \quad (3.56)$$

olarak elde edilir. Referans senaryoda tek bir 0,40 m çaplı çelik kazığının izin verilebilir taşıma gücü $Q_{all,tek} = 138,2 \text{ kN}$ olarak tanımlanmıştır. Senaryo 6 kapsamında tek bir ahşap kazığının da aynı kapasiteyi sağlaması hedeflenmektedir. Eşitlik (3.56) ile birlikte çözüldüğünde

$$1,01 L^2 = 138,2 \Rightarrow L^2 = 137,5 \Rightarrow L = 11,7 \text{ m} \quad (3.57)$$

bulunur. Buna göre gevşek kumda 0,40 m çaplı ahşap kazıkların deniz tabanından itibaren yaklaşık 11,7 m gömülmesi, referans çelik kazıkla aynı mertebede izin verilebilir düşey taşıma gücü sağlamaktadır.

3.9 Senaryo 7: Gevşek Kumda 0,10 m (4") Çaplı Ahşap Grup Kazık Düzeni

Senaryo 7, Senaryo 1 ile aynı mikro grup geometrisini ahşap kazık malzemesi için incelemektedir. Her 0,40 m çaplı daire içinde biri merkezde, altısı çevrede olmak üzere 7 adet 0,10 m çaplı içi dolu ahşap kazık bulunmaktadır.

3.9.1 Gerekli gömülme boyunun belirlenmesi (Senaryo 7)

Gevşek kum ve ahşap kazık için $K \tan \delta = 0,40$ kabulüyle 0,10 m çaplı tekil ahşap kazığının nihai taşıma gücü

$$Q_s = \frac{\pi}{2} \cdot 0,10 \cdot 0,40 \cdot 10 \cdot L^2 = 0,63 L^2 \text{ kN} \quad (3.58)$$

şeklindedir. Güvenlik katsayısı ile izin verilebilir taşıma gücü

$$Q_{all} = \frac{Q_s}{FS} = 0,25 L^2 \text{ kN} \quad (3.59)$$

olarak elde edilir. Mikro grup içinde 7 adet kazık bulunmaktadır. Çelik kazık senaryolarında olduğu gibi, tasarımda mikro grup verim katsayısı güvenli tarafta kalmak amacıyla $\eta_{\text{mikro}} = 1,0$ olarak sınırlandırılmıştır. Buna göre gevşek kumda bir mikro grubun izin verilebilir düşey taşıma gücü

$$Q_{\text{all,grup}} = \eta_{\text{mikro}} n Q_{\text{all}} = 1,76L^2 \text{ kN} \quad (3.60)$$

şeklinde yazılabilir. Referans tekil kazık kapasitesine eşdeğerlik şartı $Q_{\text{all,tek}} = 138,2 \text{ kN}$ olduğunda, Eşitlik (3.60) kullanılarak

$$1,76L^2 = 138,2 \Rightarrow L^2 = 78,6 \Rightarrow L = 8,9 \text{ m} \quad (3.61)$$

elde edilir. Buna göre gevşek kumda 0,10 m çaplı ahşap kazıkların yaklaşık 8,9 m gömülmesi durumunda, her bir mikro grup referans 0,40 m çelik kazık ile eşdeğer izin verilebilir düşey taşıma gücü sağlamaktadır.

3.10 Senaryo 8: Orta Sıkı Kumda 0,40 m (16") Çaplı Ahşap Tekil Kazık Düzeni

Senaryo 8, Senaryo 6 ile aynı tekil ahşap kazık düzenini orta sıkı kum zemin koşulları altında incelemektedir. Üstyapı yükleri ve kazık plan geometrisi değiştirilmemekte, yalnızca zemin parametreleri değişmektedir.

3.10.1 Gerekli gömülme boyunun belirlenmesi (Senaryo 8)

Orta sıkı kumda ahşap kazık için $K \tan \delta = 0,55$ ve $\gamma' = 10 \text{ kN/m}^3$ değerleri kullanılmaktadır. Buna göre 0,40 m çaplı tekil ahşap kazığının nihai çevre sürtünmesine bağlı taşıma gücü

$$Q_s = \frac{\pi}{2} \cdot 0,40 \cdot 0,55 \cdot 10 \cdot L^2 = 3,46L^2 \text{ kN} \quad (3.62)$$

olmakta, izin verilebilir taşıma gücü ise

$$Q_{\text{all}} = \frac{Q_s}{FS} = 1,38L^2 \text{ kN} \quad (3.63)$$

şeklinde yazılmaktadır. Referans tekil kazık kapasitesine eşdeğerlik şartı $Q_{all,tek} = 138,2$ kN olarak yazılabilir. Eşitlik (3.63) ile birlikte çözüldüğünde

$$1,38L^2 = 138,2 \Rightarrow L^2 = 100,0 \Rightarrow L = 10,0 \text{ m} \quad (3.64)$$

elde edilir. Buna göre orta sıkı kumda 0,40 m çaplı tekil ahşap kazıkların yaklaşık 10,0 m gömülmesi, referans çelik kazıkla aynı mertebede izin verilebilir taşıma gücü sağlamaktadır.

3.11 Senaryo 9: Orta Sıkı Kumda 0,10 m (4") Çaplı Ahşap Grup Kazık Düzeni

Senaryo 9, Senaryo 7’de tanımlanan mikro grup geometrisini orta sıkı kum zeminde değerlendirmektedir. Her 0,40 m dairesi içinde 7 adet 0,10 m çaplı içi dolu ahşap kazık bulunmaktadır.

3.11.1 Gerekli gömülme boyunun belirlenmesi (Senaryo 9)

Orta sıkı kumda ahşap kazık için $K \tan \delta = 0,55$ olduğunda, 0,10 m çaplı tekil kazığın nihai taşıma gücü

$$Q_s = \frac{\pi}{2} \cdot 0,10 \cdot 0,55 \cdot 10 \cdot L^2 = 0,86L^2 \text{ kN} \quad (3.65)$$

şeklinde yazılabilir. Güvenlik katsayısı ile izin verilebilir taşıma gücü

$$Q_{all} = \frac{Q_s}{FS} = 0,35L^2 \text{ kN} \quad (3.66)$$

olarak elde edilir. Mikro grup içinde 7 adet kazık bulunmaktadır ve tasarım kapsamında grup verim katsayısı yine $\eta_{mikro} = 1,0$ olarak sınırlandırılmaktadır. Buna göre orta sıkı kumda bir mikro grubun izin verilebilir düşey taşıma gücü

$$Q_{all,grup} = \eta_{mikro} n Q_{all} = 2,42L^2 \text{ kN} \quad (3.67)$$

şeklinde yazılabilir. Referans tekil kazık kapasitesine eşdeğerlik şartı $Q_{all,tek} = 138,2$ kN alındığında

$$2,42L^2 = 138,2 \Rightarrow L^2 = 57,1 \Rightarrow L = 7,6 \text{ m} \quad (3.68)$$

elde edilir. Buna göre orta sıkı kumda 0,10 m çaplı ahşap kazıklardan oluşan mikro grupların yaklaşık 7,6 m gömülme boyu ile referans tekil çelik kazık kapasitesine eşdeğer taşıma gücü sağladığı görülmektedir.

3.12 Senaryo 10: Sıkı Kumda 0,40 m (16") Çaplı Ahşap Tekil Kazık Düzeni

Senaryo 10, tekil ahşap kazık düzenini sıkı kum zemin koşulları altında incelemektedir. Üstyapı yükleri ve kazık plan geometrisi yine referans senaryo ile aynıdır.

3.12.1 Gerekli gömülme boyunun belirlenmesi (Senaryo 10)

Sıkı kumda ahşap kazık için $K \tan \delta = 0,70$ ve $\gamma' = 10 \text{ kN/m}^3$ değerleri kullanılmaktadır. Buna göre 0,40 m çaplı tekil ahşap kazığının nihai çevre sürtünmesine bağlı taşıma gücü

$$Q_s = \frac{\pi}{2} \cdot 0,40 \cdot 0,70 \cdot 10 \cdot L^2 = 4,40L^2 \text{ kN} \quad (3.69)$$

olmakta, izin verilebilir taşıma gücü ise

$$Q_{\text{all}} = \frac{Q_s}{FS} = 1,76L^2 \text{ kN} \quad (3.70)$$

şeklinde elde edilmektedir. Referans tekil kazık kapasitesi ile eşdeğerlik şartı $Q_{\text{all,tek}} = 138,2 \text{ kN}$ olarak yazılabilir. Eşitlik (3.70) ile birlikte çözüldüğünde

$$1,76L^2 = 138,2 \Rightarrow L^2 = 78,6 \Rightarrow L = 8,9 \text{ m} \quad (3.71)$$

elde edilir. Dolayısıyla sıkı kumda 0,40 m çaplı tekil ahşap kazıklarının yaklaşık 8,9 m gömülmesi, referans tekil çelik kazık kapasitesini karşılamaktadır.

3.13 Senaryo 11: Sıkı Kumda 0,10 m (4") Çaplı Ahşap Grup Kazık Düzeni

Senaryo 11, 0,10 m çaplı ahşap kazıklardan oluşan mikro grup düzenini sıkı kum zemin koşulları altında değerlendirmektedir. Geometri, Senaryo 7 ve Senaryo 9 ile aynıdır.

3.13.1 Gerekli gömülme boyunun belirlenmesi (Senaryo 11)

Sıkı kumda ahşap kazık için $K \tan \delta = 0,70$ olduğunda, 0,10 m çaplı tekil kazığın nihai taşıma gücü

$$Q_s = \frac{\pi}{2} \cdot 0,10 \cdot 0,70 \cdot 10 \cdot L^2 = 1,10 L^2 \text{ kN} \quad (3.72)$$

şeklinde yazılabilir. Güvenlik katsayısı ile izin verilebilir taşıma gücü

$$Q_{all} = \frac{Q_s}{FS} = 0,44 L^2 \text{ kN} \quad (3.73)$$

olarak elde edilir. Mikro grup için yine 7 adet üzerinden ve $\eta_{mikro} = 1,0$ kabulleri ile, sıkı kumda bir mikro grubun izin verilebilir taşıma gücü

$$Q_{all,grup} = \eta_{mikro} n Q_{all} = 3,08 L^2 \text{ kN} \quad (3.74)$$

şeklinde yazılabilir. Referans tekil kazık kapasitesine eşdeğerlik şartı $Q_{all,tek} = 138,2 \text{ kN}$ olduğunda

$$3,08 L^2 = 138,2 \Rightarrow L^2 = 44,9 \Rightarrow L = 6,7 \text{ m} \quad (3.75)$$

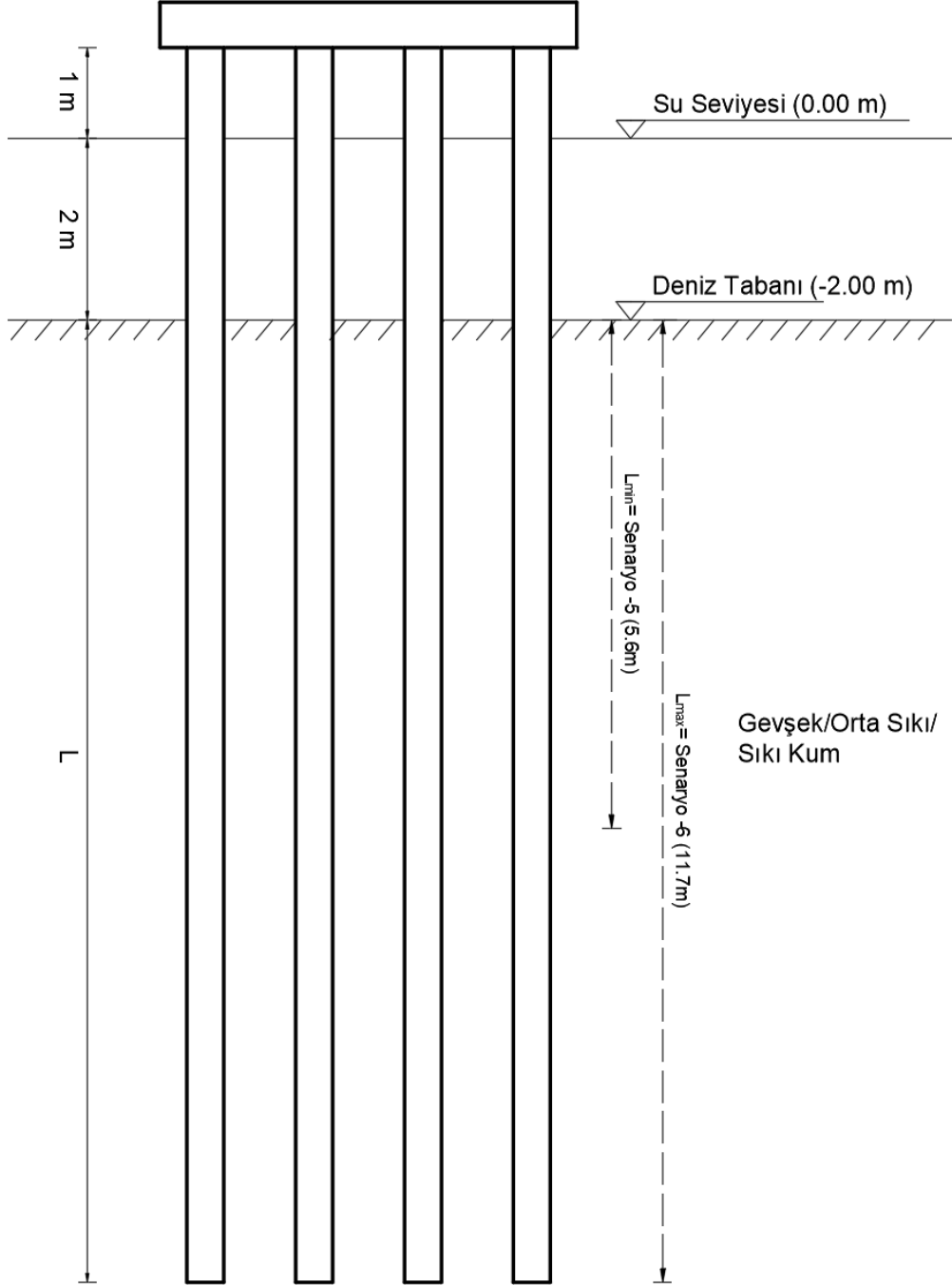
elde edilir. Buna göre sıkı kumda 0,10 m çaplı ahşap kazıklardan oluşan mikro grupların, yaklaşık 6,7 m gömülme boyu ile referans tekil çelik kazığa eşdeğer mertebede izin verilebilir düşey taşıma gücü sağladığı görülmektedir.

3.14 Senaryoların Özeti ve Karşılaştırılması

Bu bölümde önceki alt bölümlerde tanımlanan Senaryo 0–11 için elde edilen gömülme boyu ve izin verilebilir taşıma gücü değerleri toplu olarak sunulmakta ve karşılaştırmalı olarak değerlendirilmektedir.

Çizelge 3.4: Senaryo 0–11 için hesaplanan gömülme boyu değerlerinin özeti.

Senaryo	Zemin	Malzeme	Düzen	D_{ana} (m)	D_{mikro} (m)	L (m)
S0	Gevşek kum	Çelik	Tekil kazık grubu	0,40	–	10,0
S1	Gevşek kum	Çelik	Mikro grup	0,40	0,10	7,6
S2	Orta sıkı kum	Çelik	Tekil kazık grubu	0,40	–	8,6
S3	Orta sıkı kum	Çelik	Mikro grup	0,40	0,10	6,5
S4	Sıkı kum	Çelik	Tekil kazık grubu	0,40	–	7,4
S5	Sıkı kum	Çelik	Mikro grup	0,40	0,10	5,6
S6	Gevşek kum	Ahşap	Tekil kazık grubu	0,40	–	11,7
S7	Gevşek kum	Ahşap	Mikro grup	0,40	0,10	8,9
S8	Orta sıkı kum	Ahşap	Tekil kazık grubu	0,40	–	10,0
S9	Orta sıkı kum	Ahşap	Mikro grup	0,40	0,10	7,6
S10	Sıkı kum	Ahşap	Tekil kazık grubu	0,40	–	8,9
S11	Sıkı kum	Ahşap	Mikro grup	0,40	0,10	6,7



Şekil 3.7: Tüm senaryolar için örnek kazıkların kesit görünüşü

4. MALİYET ANALİZİ VE SENARYO KARŞILAŞTIRMASI

Bu bölümde, Bölüm 3 kapsamında tanımlanan Senaryo 0–11 için kazık imalatı ve çakılması süreçlerine bağlı maliyetler, 2025 yılı liman ve deniz inşaatı birim fiyat listesi esas alınarak hesaplanmaktadır. Maliyet karşılaştırması, tüm senaryolarda aynı hedef düşey taşıma gücü seviyesine (yaklaşık 1659 kN) göre boyutlandırılmış kazıkların toplam yapım maliyetini ortaya koymayı amaçlamaktadır.

Hesap yaklaşımında toplam maliyet üç ana bileşen üzerinden ifade edilmiştir: (i) şahmerdan sisteminin işbaşına getirilip hazırlanması (mobilizasyon), (ii) kazık imalatı, (iii) şahmerdan ile kazık çakılması. Çoklu mikro kazık senaryolarında ayrıca, 7 adet mikro kazığın aynı anda çakıldığı “beraber çakım” varsayımı ayrı bir alt başlık altında değerlendirilmiştir.

4.1 Maliyet Hesabı Yaklaşımı ve Kullanılan Kabuller

Toplam maliyet aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$C_{\text{top}} = C_{\text{mob}} + C_{\text{imal}} + C_{\text{çakma}} \quad (4.1)$$

Burada C_{mob} mobilizasyon (ad/tl), C_{imal} kazık imalatı, $C_{\text{çakma}}$ ise kazık çakma maliyetidir. Kazık imalatı için önce kazık kesit alanı belirlenmiştir. Çelik boru kazıklar için (dış çap D , et kalınlığı t) kesit alanı

$$A_{\text{çelik}} = \frac{\pi}{4} [D^2 - (D - 2t)^2] \quad (4.2)$$

olarak alınmıştır. Ahşap kazıklar içi dolu kabul edildiğinden kesit alanı

$$A_{\text{ahşap}} = \frac{\pi}{4} D^2 \quad (4.3)$$

şeklindedir.

Her bir kazık için toplam imal boyu L_{imal} , deniz tabanı üstünde kalan boy L_{serbest} ile deniz tabanı altındaki çakılan boyun L toplamıdır:

$$L_{\text{imal}} = L_{\text{serbest}} + L \quad (4.4)$$

Buna göre tek kazık hacmi ve toplam hacim sırasıyla

$$V_1 = A L_{\text{imal}}, \quad V_{\text{top}} = n V_1 \quad (4.5)$$

olarak tanımlanmıştır. Çelik kazıklarda malzeme birim fiyatı, ton biriminden hacim birimine dönüştürülmüştür. A.Y.G.M. tarafından yayımlanan 2025 yılı birim fiyat listesine göre çelik için birim ton fiyatı 59 659 TL/ton olarak alınmış, çelik yoğunluğu $7,85 \text{ ton/m}^3$ kabul edilmiştir (T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı Altyapı Yatırımları Genel Müdürlüğü (AYGM), 2025).

$$c_{\text{çelik}} = 59\,659 \times 7,85 = 468\,323,15 \text{ TL/m}^3 \quad (4.6)$$

elde edilmiştir. Böylece kazık imalat maliyeti

$$C_{\text{imal}} = V_{\text{top}} c \quad (4.7)$$

şeklinde hesaplanmıştır. Kazık çakma maliyetinde, çakılan toplam boy

$$L_{\text{çakma,top}} = n L \quad (4.8)$$

olarak tanımlanmış ve

$$C_{\text{çakma}} = L_{\text{çakma,top}} c_{\text{çakma}} \quad (4.9)$$

ifadesi kullanılmıştır. Burada $c_{\text{çakma}}$ ilgili kazık çapı için şahmerdan ile çakma birim fiyatıdır.

4.2 Senaryo 0: Gevşek Kumda 0,40 m (16") Çelik Tekil Kazık Grubu

Bu senaryoda kazık düzeni, Bölüm 3.1 içinde tanımlanan referans sistemdir.

- dış çap: $D = 0,40$ m,
- et kalınlığı: $t = 0,01$ m,
- deniz tabanı üstünde kalan boy: $L_{\text{serbest}} = 3$ m,
- deniz tabanı altında çakılan boy: $L = 10,0$ m,
- kazık adedi: $n = 12$.

Eşitlik (4.2) ile çelik boru kazık kesit alanı

$$A_{\text{çelik}} = \frac{\pi}{4} [0,40^2 - (0,40 - 2 \times 0,01)^2] \simeq 0,012 \text{ m}^2 \quad (4.10)$$

olarak bulunur. Toplam imal boyu Eşitlik (4.4) ile

$$L_{\text{imal}} = 3 + 10,0 = 13,0 \text{ m} \quad (4.11)$$

olduğundan, tek kazık hacmi

$$V_1 = A_{\text{çelik}} L_{\text{imal}} \simeq 0,012 \times 13,0 \simeq 0,159 \text{ m}^3 \quad (4.12)$$

ve toplam hacim

$$V_{\text{top}} = n V_1 = 12 \times 0,159 \simeq 1,911 \text{ m}^3 \quad (4.13)$$

olarak elde edilir.

Çelik kazık birim hacim fiyatı Eşitlik (4.6) ile $c_{\text{çelik}} = 468\,323,15 \text{ TL/m}^3$ alınmıştır.

Buna göre kazık imalatı

$$C_{\text{imal}} = V_{\text{top}} c_{\text{çelik}} \simeq 1,911 \times 468\,323,15 \simeq 895\,127,10 \text{ TL} \quad (4.14)$$

olarak bulunur. Bu senaryoda kazık çakma birim fiyatı $c_{\text{çakma}} = 761 \text{ TL/m}$ ve mobilizasyon maliyeti $C_{\text{mob}} = 749\,925 \text{ TL}$ alınmıştır. Çakılan toplam boy

$$L_{\text{çakma,top}} = nL = 12 \times 10,0 = 120,0 \text{ m} \quad (4.15)$$

olduğundan, çakma maliyeti

$$C_{\text{çakma}} = L_{\text{çakma,top}} c_{\text{çakma}} = 120,0 \times 761 = 91\,320 \text{ TL} \quad (4.16)$$

olarak elde edilir. Son olarak toplam maliyet

$$C_{\text{top}} = 749\,925 + 895\,127,10 + 91\,320 \simeq 1\,736\,372,10 \text{ TL} \quad (4.17)$$

şeklindedir.

Çizelge 4.1: S0 için maliyet hesabı özeti

Bileşen	İfade	Değer (TL)
Mobilizasyon	C_{mob}	749925
Kazık imalatı	C_{imal}	895 127,10
Kazık çakma	$C_{\text{çakma}}$	91 320
Toplam	C_{top}	1 736 372,10

4.3 Senaryo 1: Gevşek Kumda 0,10 m (4") Çelik Mikro-Grup Kazık Düzeni

Senaryo 1'de her bir 0,40 m (16") konumunda 7 adet 0,10 m (4") çelik boru kazıktan oluşan mikro grup kullanıldığından, bir iskele ayağı altında toplam kazık adedi $n = 84$ alınmıştır. Senaryo 1 için gömülme boyu Bölüm 3.3'te hesaplandığı üzere $L = 7,6 \text{ m}$ 'dir. Deniz tabanı üstünde kalan boy $L_{\text{serbest}} = 3 \text{ m}$ ve et kalınlığı $t = 0,01 \text{ m}$ alınmıştır.

Eşitlik (4.2) ile 0,10 m çaplı çelik boru kazığın kesit alanı

$$A_{\text{çelik,S1}} = \frac{\pi}{4} [0,10^2 - (0,10 - 2 \times 0,01)^2] = \frac{\pi}{4} (0,01 - 0,0064) \simeq 0,003 \text{ m}^2 \quad (4.18)$$

olarak bulunur. Toplam imal boyu

$$L_{imal,S1} = L_{serbest} + L = 3 + 7,6 = 10,6 \text{ m} \quad (4.19)$$

olduğundan, tek kazık hacmi

$$V_{1,S1} = A_{\text{çelik},S1} L_{imal,S1} \simeq 0,003 \times 10,6 \simeq 0,029 \text{ m}^3 \quad (4.20)$$

ve toplam hacim

$$V_{top,S1} = n V_{1,S1} = 84 \times 0,029 \simeq 2,517 \text{ m}^3 \quad (4.21)$$

olarak elde edilir.

4.3.1 İmalat, çakma ve toplam maliyet (normal çakım)

Çelik birim hacim fiyatı $c_{\text{çelik}} = 468\,323,15 \text{ TL/m}^3$ alınmıştır (bkz. Eşitlik (4.6)). Buna göre kazık imalat maliyeti

$$C_{imal,S1} = V_{top,S1} c_{\text{çelik}} \simeq 2,517 \times 468\,323,15 \simeq 1\,179\,025,40 \text{ TL} \quad (4.22)$$

olarak bulunur.

Senaryo 1 için çakma birim fiyatı $c_{\text{çakma}} = 434,86 \text{ TL/m}$ ve mobilizasyon $C_{mob} = 749\,925 \text{ TL}$ alınmıştır Normal çakım yaklaşımında çakılan toplam boy

$$L_{\text{çakma},top,S1} = nL = 84 \times 7,6 = 638,4 \text{ m} \quad (4.23)$$

olduğundan çakma maliyeti

$$C_{\text{çakma},S1} = L_{\text{çakma},top,S1} c_{\text{çakma}} = 638,4 \times 434,86 = 277\,614,62 \text{ TL} \quad (4.24)$$

olarak elde edilir. Böylece toplam maliyet

$$C_{top,S1} = C_{mob} + C_{imal,S1} + C_{\text{çakma},S1} \simeq 2\,206\,565,02 \text{ TL} \quad (4.25)$$

olarak hesaplanır.

4.3.2 Alternatif: beraber çakım varsayımı (7 mikro kazık aynı anda)

Bu tez kapsamında “beraber çakım” varsayımı, 7 adet mikro kazığın aynı anda çakılması şeklinde tanımlandığından, çakma maliyeti hesabında eşdeğer çakım adedi $n_2 = n/7 = 12$ alınmıştır. Buna göre eşdeğer çakılan toplam boy

$$L_{\text{çakma},top,S1}^{(beraber)} = n_2 L = 12 \times 7,6 = 91,2 \text{ m} \quad (4.26)$$

olur ve çakma maliyeti

$$C_{\text{çakma},S1}^{(beraber)} = 91,2 \times 434,86 = 39\,659,23 \text{ TL} \quad (4.27)$$

olarak hesaplanır. İmalat maliyeti değişmediğinden, toplam maliyet

$$C_{top,S1}^{(beraber)} = 749\,925 + 1\,179\,025,40 + 39\,659,23 \simeq 1\,968\,609,63 \text{ TL} \quad (4.28)$$

şeklindedir.

Çizelge 4.2: S1 için maliyet hesabı özeti

Bileşen	Normal çakım (TL)	Beraber çakım (TL)
Mobilizasyon	749 925	749 925
Kazık imalatı	1 179 025,40	1 179 025,40
Kazık çakma	277 614,62	39 659,23
Toplam	2 206 565,02	1 968 609,63

4.4 Senaryo 2: Orta Sıkı Kumda 0,40 m (16") Çelik Tekil Kazık Grubu

Senaryo 2’de kazık düzeni referans senaryo (S0) ile aynıdır (12 adet tekil çelik boru kazık). Farklı olarak zemin orta sıkı kum kabul edildiğinden, Bölüm 3.4 kapsamında bulunan gömülme boyu $L = 8,6 \text{ m}$ ’dir. $D = 0,40 \text{ m}$, $t = 0,01 \text{ m}$, $L_{serbest} = 3 \text{ m}$ ve $n = 12$ alınmıştır.

Çelik boru kazık kesit alanı Eşitlik (4.2) ile

$$A_{\text{çelik},S2} = \frac{\pi}{4} [0,40^2 - (0,40 - 2 \times 0,01)^2] \simeq 0,012 \text{ m}^2 \quad (4.29)$$

olarak bulunur. Toplam imal boyu

$$L_{\text{imal},S2} = 3 + 8,6 = 11,6 \text{ m} \quad (4.30)$$

olduğundan tek kazık hacmi

$$V_{1,S2} = A_{\text{çelik},S2} L_{\text{imal},S2} \simeq 0,012 \times 11,6 \simeq 0,142 \text{ m}^3 \quad (4.31)$$

ve toplam hacim

$$V_{\text{top},S2} = n V_{1,S2} = 12 \times 0,142 \simeq 1,705 \text{ m}^3 \quad (4.32)$$

olarak elde edilir. Çelik birim hacim fiyatı $c_{\text{çelik}} = 468323,15 \text{ TL/m}^3$ alınmıştır (bkz. Eşitlik (4.6)). Buna göre kazık imalat maliyeti

$$C_{\text{imal},S2} = V_{\text{top},S2} c_{\text{çelik}} \simeq 1,705 \times 468323,15 \simeq 798728,79 \text{ TL} \quad (4.33)$$

olarak bulunur. Bu senaryoda çakma birim fiyatı $c_{\text{çakma}} = 761 \text{ TL/m}$ ve mobilizasyon $C_{\text{mob}} = 749925 \text{ TL}$ alınmıştır. Çakılan toplam boy

$$L_{\text{çakma,top},S2} = nL = 12 \times 8,6 = 103,2 \text{ m} \quad (4.34)$$

olduğundan çakma maliyeti

$$C_{\text{çakma},S2} = L_{\text{çakma,top},S2} c_{\text{çakma}} = 103,2 \times 761 = 78535,20 \text{ TL} \quad (4.35)$$

olarak elde edilir.

Toplam maliyet ise

$$C_{\text{top},S2} = 749925 + 798728,79 + 78535,20 \simeq 1\,627\,188,99 \text{ TL} \quad (4.36)$$

şeklindedir.

Çizelge 4.3: Senaryo 2 için maliyet hesabı özeti.

Bileşen	İfade	Değer (TL)
Mobilizasyon	C_{mob}	749925
Kazık imalatı	$C_{\text{imal},S2}$	798728,79
Kazık çakma	$C_{\text{çakma},S2}$	78535,20
Toplam	$C_{\text{top},S2}$	1627188,99

4.5 Senaryo 3: Orta Sıkı Kumda 0,10 m (4") Çelik Mikro-Grup Kazık Düzeni

Senaryo 3'te her bir 0,40 m (16") konumunda 7 adet 0,10 m (4") çelik boru kazıktan oluşan mikro grup bulunduğundan, bir iskele ayağı altında toplam kazık adedi $n = 84$ 'tür. Orta sıkı kum koşulları için gömülme boyu Bölüm 3.5 kapsamında $L = 6,5$ m bulunmuştur. $t = 0,01$ m ve $L_{\text{serbest}} = 3$ m alınmıştır.

0,10 m çaplı çelik boru kazık kesit alanı

$$A_{\text{çelik},S3} = \frac{\pi}{4} [0,10^2 - (0,10 - 2 \times 0,01)^2] \simeq 0,002 \text{ m}^2 \quad (4.37)$$

olarak bulunur. Toplam imal boyu

$$L_{\text{imal},S3} = 3 + 6,5 = 9,5 \text{ m} \quad (4.38)$$

olduğundan tek kazık hacmi

$$V_{1,S3} = A_{\text{çelik},S3} L_{\text{imal},S3} \simeq 0,002 \times 9,5 \simeq 0,026 \text{ m}^3 \quad (4.39)$$

ve toplam hacim

$$V_{\text{top},S3} = 84 \times 0,026 \simeq 2,256 \text{ m}^3 \quad (4.40)$$

olarak elde edilir.

4.5.1 İmalat, çakma ve toplam maliyet (normal çakım)

Çelik birim hacim fiyatı $c_{\text{çelik}} = 468\,323,15 \text{ TL/m}^3$ alınarak kazık imalat maliyeti

$$C_{\text{imal},S3} = V_{\text{top},S3} c_{\text{çelik}} \simeq 2,256 \times 468\,323,15 \simeq 1\,056\,673,70 \text{ TL} \quad (4.41)$$

olarak bulunur.

Senaryo 3 için çakma birim fiyatı $c_{\text{çakma}} = 434,86 \text{ TL/m}$, mobilizasyon $C_{\text{mob}} = 749\,925 \text{ TL}$ 'dir. Normal çakımda çakılan toplam boy

$$L_{\text{çakma,top},S3} = 84 \times 6,5 = 546,0 \text{ m} \quad (4.42)$$

olduğundan çakma maliyeti

$$C_{\text{çakma},S3} = 546,0 \times 434,86 = 237\,433,56 \text{ TL} \quad (4.43)$$

ve toplam maliyet

$$C_{\text{top},S3} = 749\,925 + 1\,056\,673,70 + 237\,433,56 \simeq 2\,044\,032,26 \text{ TL} \quad (4.44)$$

olarak elde edilir.

4.5.2 Alternatif: beraber çakım varsayımı (7 mikro kazık aynı anda)

Beraber çakım varsayımında eşdeğer çakım adedi $n_2 = 84/7 = 12$ alınmıştır. Buna göre eşdeğer çakılan toplam boy

$$L_{\text{çakma,top},S3}^{(\text{beraber})} = 12 \times 6,5 = 78,0 \text{ m} \quad (4.45)$$

olur ve çakma maliyeti

$$C_{\text{çakma,S3}}^{(\text{beraber})} = 78,0 \times 434,86 = 33\,919,08 \text{ TL} \quad (4.46)$$

şeklindedir. İmalat maliyeti değişmediğinden, toplam maliyet

$$C_{\text{top,S3}}^{(\text{beraber})} = 749\,925 + 1\,056\,673,70 + 33\,919,08 \simeq 1\,840\,517,78 \text{ TL} \quad (4.47)$$

olarak hesaplanır.

Çizelge 4.4: Senaryo 3 için maliyet hesabı özeti.

Bileşen	Normal çakım (TL)	Beraber çakım (TL)
Mobilizasyon	749 925	749 925
Kazık imalatı	1 056 673,70	1 056 673,70
Kazık çakma	237 433,56	33 919,08
Toplam	2 044 032,26	1 840 517,78

4.6 Senaryo 4: Sıkı Kumda 0,40 m (16") Çelik Tekil Kazık Grubu

Senaryo 4'te kazık düzeni referans düzen ile aynıdır (12 adet tekil çelik boru kazık). Zemin sıkı kum kabul edildiğinden, Bölüm 3.6 kapsamında bulunan gömülme boyu $L = 7,4$ m'dir. Hesaplarda $D = 0,40$ m, $t = 0,01$ m, $L_{\text{serbest}} = 3$ m ve $n = 12$ alınmıştır.

Çelik boru kazık kesit alanı Eşitlik (4.2) ile

$$A_{\text{çelik,S4}} = \frac{\pi}{4} [0,40^2 - (0,40 - 2 \times 0,01)^2] \simeq 0,012 \text{ m}^2 \quad (4.48)$$

olarak bulunur. Toplam imal boyu

$$L_{\text{imal,S4}} = 3 + 7,4 = 10,4 \text{ m} \quad (4.49)$$

olduğundan tek kazık hacmi

$$V_{1,S4} = A_{\text{çelik,S4}} L_{\text{imal,S4}} \simeq 0,012 \times 10,4 \simeq 0,127 \text{ m}^3 \quad (4.50)$$

ve toplam hacim

$$V_{\text{top,S4}} = n V_{1,S4} = 12 \times 0,127 \simeq 1,529 \text{ m}^3 \quad (4.51)$$

olarak elde edilir. Çelik birim hacim fiyatı Eşitlik (4.6) ile $c_{\text{çelik}} = 468\,323,15 \text{ TL/m}^3$ alınarak kazık imalat maliyeti

$$C_{\text{imal,S4}} = V_{\text{top,S4}} c_{\text{çelik}} \simeq 1,529076 \times 468\,323,15 \simeq 716\,101,68 \text{ TL} \quad (4.52)$$

olarak bulunur. Bu senaryoda çakma birim fiyatı $c_{\text{çakma}} = 761 \text{ TL/m}$ ve mobilizasyon $C_{\text{mob}} = 749\,925 \text{ TL}$ alınmıştır. Çakılan toplam boy

$$L_{\text{çakma,top,S4}} = nL = 12 \times 7,4 = 88,8 \text{ m} \quad (4.53)$$

olduğundan çakma maliyeti

$$C_{\text{çakma,S4}} = L_{\text{çakma,top,S4}} c_{\text{çakma}} = 88,8 \times 761 = 67\,576,80 \text{ TL} \quad (4.54)$$

olarak elde edilir. Toplam maliyet ise

$$C_{\text{top,S4}} = 749\,925 + 716\,101,68 + 67\,576,80 \simeq 1\,533\,604,28 \text{ TL} \quad (4.55)$$

şeklindedir.

Çizelge 4.5: Senaryo 4 için maliyet hesabı özeti.

Bileşen	İfade	Değer (TL)
Mobilizasyon	C_{mob}	749 925
Kazık imalatı	$C_{\text{imal,S4}}$	716 101,68
Kazık çakma	$C_{\text{çakma,S4}}$	67 576,80
Toplam	$C_{\text{top,S4}}$	1 533 604,28

4.7 Senaryo 5: Sıkı Kumda 0,10 m (4") Çelik Mikro-Grup Kazık Düzeni

Senaryo 5'te her bir 0,40 m (16") konumunda 7 adet 0,10 m (4") çelik boru kazıktan oluşan mikro grup bulunduğundan, bir iskele ayağı altında toplam kazık adedi $n = 84$ 'tür. Sıkı kum koşulları için gömülme boyu Bölüm 3.7 kapsamında $L = 5,6 \text{ m}$ bulunmuştur. Hesaplarda $t = 0,01 \text{ m}$ ve $L_{\text{serbest}} = 3 \text{ m}$ alınmıştır.

0,10 m çaplı çelik boru kazık kesit alanı

$$A_{\text{çelik,S5}} = \frac{\pi}{4} [0,10^2 - (0,10 - 2 \times 0,01)^2] \simeq 0,002 \text{ m}^2 \quad (4.56)$$

olarak bulunur. Toplam imal boyu

$$L_{\text{imal,S5}} = 3 + 5,6 = 8,6 \text{ m} \quad (4.57)$$

olduğundan tek kazık hacmi

$$V_{1,S5} = A_{\text{çelik,S5}} L_{\text{imal,S5}} \simeq 0,002 \times 8,6 \simeq 0,024 \text{ m}^3 \quad (4.58)$$

ve toplam hacim

$$V_{\text{top,S5}} = 84 \times 0,024 \simeq 2,042 \text{ m}^3 \quad (4.59)$$

olarak elde edilir.

4.7.1 İmalat, çakma ve toplam maliyet (normal çakım)

Çelik birim hacim fiyatı $c_{\text{çelik}} = 468\,323,15 \text{ TL/m}^3$ alınarak kazık imalat maliyeti

$$C_{\text{imal,S5}} = V_{\text{top,S5}} c_{\text{çelik}} \simeq 2,042538 \times 468\,323,15 \simeq 956\,567,77 \text{ TL} \quad (4.60)$$

olarak bulunur.

Senaryo 5 için çakma birim fiyatı $c_{\text{çakma}} = 434,86 \text{ TL/m}$, mobilizasyon $C_{\text{mob}} = 749\,925 \text{ TL}$ 'dir. Normal çakımda çakılan toplam boy

$$L_{\text{çakma,top,S5}} = 84 \times 5,6 = 470,4 \text{ m} \quad (4.61)$$

olduğundan çakma maliyeti

$$C_{\text{çakma,S5}} = 470,4 \times 434,86 = 204\,558,14 \text{ TL} \quad (4.62)$$

ve toplam maliyet

$$C_{\text{top},S5} = 749\,925 + 956\,567,77 + 204\,558,14 \simeq 1\,911\,050,92 \text{ TL} \quad (4.63)$$

olarak elde edilir.

4.7.2 Alternatif: beraber çakım varsayımı (7 mikro kazık aynı anda)

Beraber çakım varsayımında eşdeğer çakım adedi $n_2 = 84/7 = 12$ alınmıştır. Buna göre eşdeğer çakılan toplam boy

$$L_{\text{çakma,top},S5}^{(\text{beraber})} = 12 \times 5,6 = 67,2 \text{ m} \quad (4.64)$$

olur ve çakma maliyeti

$$C_{\text{çakma},S5}^{(\text{beraber})} = 67,2 \times 434,86 = 29\,222,59 \text{ TL} \quad (4.65)$$

şeklindedir. İmalat maliyeti değişmediğinden toplam maliyet

$$C_{\text{top},S5}^{(\text{beraber})} = 749\,925 + 956\,567,77 + 29\,222,59 \simeq 1\,735\,715,37 \text{ TL} \quad (4.66)$$

olarak hesaplanır.

Çizelge 4.6: Senaryo 5 için maliyet hesabı özeti.

Bileşen	Normal çakım (TL)	Beraber çakım (TL)
Mobilizasyon	749 925	749 925
Kazık imalatı	956 567,77	956 567,77
Kazık çakma	204 558,14	29 222,59
Toplam	1 911 050,92	1 735 715,37

4.8 Senaryo 6: Gevşek Kumda 0,40 m (16") Çaplı Ahşap Tekil Kazık Düzeni – Maliyet Hesabı

Bu senaryoda 12 adet tekil içi dolu ahşap kazık kullanılmaktadır. Toplam maliyet,

$$C_{\text{top},S6} = C_{\text{mob}} + C_{\text{haz},S6} + C_{\text{çak},S6} \quad (4.67)$$

şeklinde ifade edilmiştir. Burada C_{mob} şahmerdan mobilizasyon bedeli, $C_{haz,S6}$ ahşap kazık hazırlık bedeli (m^3), $C_{çak,S6}$ ise kazıkların şahmerdan ile çakım bedelidir (m) (T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı Altyapı Yatırımları Genel Müdürlüğü (AYGM), 2025). Hazırlık metrajında imal boyu $L_{imal} = L_{serbest} + L$ alınmış, çakma metrajında ise yalnızca gömülme boyu L kullanılmıştır.

- kazık adedi: $n = 12$,
- çap: $D = 0,40$ m,
- deniz tabanı üstünde kalan boy: $L_{serbest} = 3,0$ m,
- deniz tabanı altında çakılan boy: $L = 11,7$ m,
- toplam imal boyu: $L_{imal} = 3,0 + 11,7 = 14,7$ m.

Ahşap kazıklar içi dolu kabul edildiğinden kesit alanı

$$A_{ahşap,S6} = \frac{\pi}{4} D^2 = \frac{\pi}{4} (0,40)^2 \simeq 0,125 \text{ m}^2 \quad (4.68)$$

olarak bulunur. Toplam ahşap hacmi

$$V_{top,S6} = n A_{ahşap,S6} L_{imal} = 12 \times 0,125 \times 14,7 \simeq 22,167 \text{ m}^3 \quad (4.69)$$

şeklinde. Bu senaryoda birim fiyatlar $C_{mob} = 749925$ TL, $c_{haz} = 6400$ TL/ m^3 ve $c_{çak} = 1756,01$ TL/m olarak alınmıştır (T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı Altyapı Yatırımları Genel Müdürlüğü (AYGM), 2025). Kesit alanı $A_{ahşap,S6} \simeq 0,125 \text{ m}^2 \simeq 1256,6 \text{ cm}^2$ olduğundan, çakma birim fiyatı “900 cm^2 ’den büyük” sınıfından seçilmiştir. Buna göre hazne maliyeti $C_{haz,S6} = V_{top,S6} c_{haz} = 22,1671 \times 6400 \simeq 141869,30$ TL olarak hesaplanmıştır. Toplam çakma boyu $L_{çak,top,S6} = nL = 12 \times 11,7 = 140,4$ m olup, buna karşılık çakma maliyeti $C_{çak,S6} = L_{çak,top,S6} c_{çak} = 140,4 \times 1756,01 \simeq 246543,80$ TL bulunmuştur.

Buna göre toplam maliyet, $749\,925 + 141\,869,30 + 246\,543,80 \simeq 1\,138\,338,10$ TL olarak elde edilir.

Çizelge 4.7: Senaryo 6 için maliyet hesabı özeti.

Bileşen	İfade	Değer (TL)
Mobilizasyon	C_{mob}	749 925
Hazırlık (hacim)	$C_{haz,S6}$	141 869,30
Çakma	$C_{çak,S6}$	246 543,80
Toplam	$C_{top,S6}$	1 138 338,10

4.9 Senaryo 7: Gevşek Kumda 0,10 m (4") Çaplı Ahşap Mikro-Grup Kazık Düzeni – Maliyet Hesabı

Senaryo 7’de, her bir referans kazık konumunda 7 adet 0,10 m çaplı içi dolu ahşap kazıktan oluşan mikro grup bulunduğundan, bir iskele ayağı altında toplam kazık sayısı $n = 12 \times 7 = 84$ ’tür.

Boyutlandırma sonucunda gömülme boyu $L = 8,9$ m olarak alınmıştır. Deniz tabanı üstünde kalan boy $L_{serbest} = 3,0$ m kabul edilmiştir. Toplam maliyet,

$$C_{top,S7} = C_{mob} + C_{haz,S7} + C_{çak,S7} \quad (4.70)$$

şeklinde ifade edilmiştir. Burada C_{mob} mobilizasyon, $C_{haz,S7}$ ahşap kazık hazırlık (hacim), $C_{çak,S7}$ ise şahmerdan ile çakma maliyetidir (T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı Altyapı Yatırımları Genel Müdürlüğü (AYGM), 2025).

Ahşap kazıklar içi dolu kabul edildiğinden kesit alanı

$$A_{ahşap,S7} = \frac{\pi}{4} D^2 = \frac{\pi}{4} (0,10)^2 \simeq 0,007 \text{ m}^2 \quad (4.71)$$

olarak bulunur. Toplam imal boyu

$$L_{imal,S7} = L_{serbest} + L = 3,0 + 8,9 = 11,9 \text{ m} \quad (4.72)$$

olduğuna göre toplam hacim

$$V_{\text{top},S7} = nA_{\text{ahşap},S7}L_{\text{imal},S7} = 84 \times 0,007 \times 11,9 \simeq 7,850 \text{ m}^3 \quad (4.73)$$

olarak elde edilir.

4.9.1 Hazırlık ve çakma maliyeti (normal çakım)

Bu senaryoda birim fiyatlar aşağıdaki şekilde alınmıştır: $C_{\text{mob}} = 749925$ TL, $c_{\text{haz}} = 6400$ TL/m³ ve kesit alanı $A_{\text{ahşap},S7} \simeq 0,007 \text{ m}^2 \simeq 78,5 \text{ cm}^2$ olduğundan “450 cm²’den küçük” sınıfından $c_{\text{çak}} = 981,14$ TL/m (T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı Altyapı Yatırımları Genel Müdürlüğü (AYGM), 2025).

Hazırlık maliyeti,

$$C_{\text{haz},S7} = V_{\text{top},S7} c_{\text{haz}} = 7,85084 \times 6400 \simeq 50245,38 \text{ TL} \quad (4.74)$$

olarak hesaplanır.

Normal çakım yaklaşımında toplam çakılan boy,

$$L_{\text{çak,top},S7} = nL = 84 \times 8,9 = 747,6 \text{ m} \quad (4.75)$$

oldüğundan çakma maliyeti,

$$C_{\text{çak},S7}^{(\text{normal})} = L_{\text{çak,top},S7} c_{\text{çak}} = 747,6 \times 981,14 = 733500,26 \text{ TL} \quad (4.76)$$

şeklindedir. Buna göre toplam maliyet,

$$C_{\text{top},S7}^{(\text{normal})} = 749925 + 50245,38 + 733500,26 \simeq 1533670,64 \text{ TL} \quad (4.77)$$

olarak bulunur.

4.9.2 Alternatif: beraber çakım varsayımı (7 mikro kazık aynı anda)

Bu tez kapsamında “beraber çakım” varsayımı, 7 adet mikro kazığın aynı anda çakılması şeklinde tanımlandığından, çakma maliyeti hesabında eşdeğer çakım adedi $n_2 = n/7 = 12$ alınmıştır. Bu durumda toplam çakılan boy,

$$L_{\text{çak,top,S7}}^{(\text{beraber})} = n_2 L = 12 \times 8,9 = 106,8 \text{ m} \quad (4.78)$$

Ahşap kazıkların çakım maliyetinde kullanılacak birim fiyat kalemi, çakılan kazığın kesit alanına göre seçilmektedir (Bkz. Çizelge 4.8). Bu nedenle, çoklu kazık grubu (örneğin 7’li mikro kazık düzeni) için poz seçimi yapılırken kazıkların kesit alanları toplanmamış, her bir kazık kendi kesit alanına karşılık gelen aralıkta değerlendirilmiştir.

Dairesel kesitli bir ahşap kazık için kesit alanı

$$A = \frac{\pi d^2}{4} \quad (4.79)$$

ifadesiyle hesaplanmış, elde edilen A değerine göre ilgili çakım kalemi (450 cm²’ye kadar, 450–900 cm² veya 900 cm²’den büyük) seçilmiştir. Böylece çakım maliyeti, seçilen birim fiyat ile toplam çakılan kazık boyunun çarpımı üzerinden hesaplanmış, mobilizasyon bedeli ise iş başına bir defa alınmıştır.

Çizelge 4.8: Şahmerdan ile ahşap kazık çakılmasına ilişkin birim fiyatlar.

İş kalemi	Birim	Birim fiyat (TL)
Şahmerdan ile Ahşap Kazık Çakılması (450 cm ² ’ye kadar)	m	981,14
Şahmerdan ile Ahşap Kazık Çakılması (450–900 cm ²)	m	1 428,98
Şahmerdan ile Ahşap Kazık Çakılması (900 cm ² ve 900 cm ² ’den büyük)	m	1 756,01

S7 senaryosunda tekil bir 0,40 m kazık yerine, çapı $d = 0,10$ m olan $n = 7$ adet ahşap mikro kazığın beraber çakıldığı kabul edilmiştir. Beraber çakım durumunda, çakım birim fiyatının seçiminde her bir mikro kazığın kesit alanı yerine, 7 adet mikro kazığın

eşdeğer toplam kesit alanı esas alınmıştır. Dairesel kesitli bir kazık için kesit alanı Eşitlik (4.79)'deki gibi olduğundan, $d = 0,10$ m için tek bir mikro kazığın kesit alanı $A_1 \simeq 78,5 \text{ cm}^2$ bulunur. Beraber çakım varsayımı altında 7 kazığın eşdeğer kesit alanı

$$A_{eq} = nA_1 \simeq 7 \times 78,5 \simeq 549,5 \text{ cm}^2 \quad (4.80)$$

olduğundan, A_{eq} değeri $450\text{--}900 \text{ cm}^2$ aralığına karşılık gelmekte ve Çizelge 4.8'te verilen $c_{\text{çak}} = 1428,98 \text{ TL/m}$ birim fiyatı kullanılmıştır.

Bu durumda beraber çakım için çakım maliyeti,

$$C_{\text{çak},S7}^{(\text{beraber})} = L_{\text{çak,top},S7}^{(\text{beraber})} c_{\text{çak}} = 106,8 \times 1428,98 = 152615,06 \text{ TL} \quad (4.81)$$

olarak elde edilir. Hazırlık ve mobilizasyon maliyetleri değişmediğinden toplam maliyet,

$$C_{\text{top},S7}^{(\text{beraber})} = 749925 + 50245,38 + 152615,06 \simeq 952785,44 \text{ TL} \quad (4.82)$$

şeklinde bulunur.

Çizelge 4.9: Senaryo 7 için maliyet hesabı özeti.

Bileşen	Normal çakım (TL)	Beraber çakım (TL)
Mobilizasyon	749 925	749 925
Hazırlık (hacim)	50 245,38	50 245,38
Çakma	733 500,26	152 615,06
Toplam	1 533 670,64	952 785,44

4.10 Senaryo 8: Orta Sıkı Kumda 0,40 m (16") Çaplı Ahşap Tekil Kazık Grubu – Maliyet Hesabı

Senaryo 8'de, referans geometrisi korunarak 12 adet tekil içi dolu ahşap kazık kullanılmaktadır. Geoteknik boyutlandırma sonucunda gömülme boyu $L = 10,0$ m olarak alınmıştır. Deniz tabanı üstünde kalan boy $L_{\text{serbest}} = 3,0$ m kabul edilmiştir.

Toplam maliyet,

$$C_{\text{top,S8}} = C_{\text{mob}} + C_{\text{haz,S8}} + C_{\text{çak,S8}} \quad (4.83)$$

şeklinde ifade edilmiştir. Burada C_{mob} mobilizasyon, $C_{\text{haz,S8}}$ ahşap kazık hazırlık (hacim), $C_{\text{çak,S8}}$ ise şahmerdan ile çakma maliyetidir (T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı Altyapı Yatırımları Genel Müdürlüğü (AYGM), 2025).

Ahşap kazıklar içi dolu kabul edildiğinden kesit alanı

$$A_{\text{ahşap,S8}} = \frac{\pi}{4} D^2 = \frac{\pi}{4} (0,40)^2 \simeq 0,125 \text{ m}^2 \quad (4.84)$$

olarak bulunur. Toplam imal boyu

$$L_{\text{imal,S8}} = L_{\text{serbest}} + L = 3,0 + 10,0 = 13,0 \text{ m} \quad (4.85)$$

olduğuna göre (kazık adedi $n = 12$), toplam hacim

$$V_{\text{top,S8}} = n A_{\text{ahşap,S8}} L_{\text{imal,S8}} = 12 \times 0,125 \times 13,0 \simeq 19,603 \text{ m}^3 \quad (4.86)$$

olarak elde edilir.

Bu senaryoda birim fiyatlar aşağıdaki şekilde alınmıştır: $C_{\text{mob}} = 749925 \text{ TL}$, $c_{\text{haz}} = 6400 \text{ TL/m}^3$ ve $c_{\text{çak}} = 1756,01 \text{ TL/m}$ (T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı Altyapı Yatırımları Genel Müdürlüğü (AYGM), 2025). Bu kesit alanı $A_{\text{ahşap,S8}} \simeq 0,125 \text{ m}^2$ olduğundan $\simeq 1256,6 \text{ cm}^2$ ile “900 cm^2 ’den büyük” sınıfına karşılık gelmektedir.

Hazırlık maliyeti,

$$C_{\text{haz,S8}} = V_{\text{top,S8}} c_{\text{haz}} = 19,603 \times 6400 \simeq 125462,64 \text{ TL} \quad (4.87)$$

olarak hesaplanır.

Toplam çakılan boy,

$$L_{\text{çak,top,S8}} = nL = 12 \times 10,0 = 120,0 \text{ m} \quad (4.88)$$

olduğundan çakma maliyeti,

$$C_{\text{çak,S8}} = L_{\text{çak,top,S8}} c_{\text{çak}} = 120,0 \times 1756,01 \simeq 210721,20 \text{ TL} \quad (4.89)$$

şeklindedir. Buna göre toplam maliyet,

$$C_{\text{top,S8}} = 749925 + 125462,64 + 210721,20 \simeq 1086108,84 \text{ TL} \quad (4.90)$$

olarak elde edilir.

Çizelge 4.10: Senaryo 8 için maliyet hesabı özeti.

Bileşen	İfade	Değer (TL)
Mobilizasyon	C_{mob}	749 925
Hazırlık (hacim)	$C_{\text{haz,S8}}$	125 462,64
Çakma	$C_{\text{çak,S8}}$	210 721,20
Toplam	$C_{\text{top,S8}}$	1 086 108,84

4.11 Senaryo 9: Orta Sıkı Kumda 0,10 m (4") Çaplı Ahşap Mikro-Grup Kazık Düzeni – Maliyet Hesabı

Senaryo 9’da, her bir referans kazık konumunda 7 adet 0,10 m çaplı içi dolu ahşap kazıktan oluşan mikro grup bulunduğundan, bir iskele ayağı altında toplam kazık adedi $n = 12 \times 7 = 84$ ’tür. Orta sıkı kum koşulları için gömülme boyu $L = 7,6$ m olarak hesaplanmıştır. Deniz tabanı üstünde kalan boy $L_{\text{serbest}} = 3,0$ m kabul edilmiştir. Toplam maliyet,

$$C_{\text{top,S9}} = C_{\text{mob}} + C_{\text{haz,S9}} + C_{\text{çak,S9}} \quad (4.91)$$

şeklinde ifade edilmiştir. Burada C_{mob} mobilizasyon, $C_{\text{haz,S9}}$ ahşap kazık hazırlık (hacim), $C_{\text{çak,S9}}$ ise şahmerdan ile çakma maliyetidir (T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı Altyapı Yatırımları Genel Müdürlüğü (AYGM), 2025).

Ahşap kazıklar içi dolu kabul edildiğinden kesit alanı

$$A_{\text{ahşap,S9}} = \frac{\pi}{4} D^2 = \frac{\pi}{4} (0,10)^2 \simeq 0,007 \text{ m}^2 \quad (4.92)$$

olarak bulunur. Toplam imal boyu

$$L_{\text{imal,S9}} = L_{\text{serbest}} + L = 3,0 + 7,6 = 10,6 \text{ m} \quad (4.93)$$

olduğuna göre toplam hacim

$$V_{\text{top,S9}} = n A_{\text{ahşap,S9}} L_{\text{imal,S9}} = 84 \times 0,007 \times 10,6 \simeq 6,993 \text{ m}^3 \quad (4.94)$$

olarak elde edilir.

Bu senaryoda birim fiyatlar aşağıdaki şekilde alınmıştır: $C_{\text{mob}} = 749\,925$ TL ve $c_{\text{haz}} = 6\,400$ TL/m³. Kesit alanı $A_{\text{ahşap,S9}} \simeq 0,007 \text{ m}^2 \simeq 78,5 \text{ cm}^2$ olduğundan çakma birim fiyatı “450 cm²’den küçük” sınıfından $c_{\text{çak}} = 981,14$ TL/m alınmıştır (T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı Altyapı Yatırımları Genel Müdürlüğü (AYGM), 2025).

Hazırlık maliyeti, $C_{\text{haz,S9}} = V_{\text{top,S9}} c_{\text{haz}} = 6,993 \times 6\,400 \simeq 44\,756,39$ TL olarak hesaplanır.

4.11.1 Normal çakım (84 kazık ayrı ayrı)

Normal çakım yaklaşımında toplam çakılan boy,

$$L_{\text{çak,top,S9}} = nL = 84 \times 7,6 = 638,4 \text{ m} \quad (4.95)$$

olduğundan çakma maliyeti,

$$C_{\text{çak,S9}}^{(\text{normal})} = L_{\text{çak,top,S9}} c_{\text{çak}} = 638,4 \times 981,14 = 626\,359,78 \text{ TL} \quad (4.96)$$

şeklindedir.

Buna göre toplam maliyet normal çakım için, $749\,925 + 44\,756,39 + 626\,359,78 \simeq 1\,421\,041,16$ TL olarak bulunur.

4.11.2 Alternatif: beraber çakım varsayımı (7 mikro kazık aynı anda)

Bu tez kapsamında “beraber çakım” varsayımı, 7 adet mikro kazığın aynı anda çakılması şeklinde tanımlanmıştır. Bu durumda çakım birim fiyatının seçiminde, tek bir mikro kazığın kesit alanı yerine 7 kazığın eşdeğer toplam kesit alanı esas alınmıştır. $d = 0,10$ m için $A_1 \simeq 78,5 \text{ cm}^2$ ve $A_{eq} = 7A_1 \simeq 549,5 \text{ cm}^2$ elde edildiğinden, eşdeğer kesit alanı $450\text{--}900 \text{ cm}^2$ aralığına karşılık gelmekte, bu nedenle Çizelge 4.8’te verilen $c_{\text{çak}} = 1\,428,98$ TL/m birim fiyatı kullanılmıştır.

Bu durumda eşdeğer çakım adedi $n_2 = n/7 = 12$ alınır ve toplam çakılan boy,

$$L_{\text{çak,top,S9}}^{(\text{beraber})} = n_2 L = 12 \times 7,6 = 91,2 \text{ m} \quad (4.97)$$

olur. Çakma maliyeti,

$$C_{\text{çak,S9}}^{(\text{beraber})} = L_{\text{çak,top,S9}}^{(\text{beraber})} c_{\text{çak}} = 91,2 \times 1\,428,98 = 130\,322,98 \text{ TL} \quad (4.98)$$

ve toplam maliyet,

$$C_{\text{top,S9}}^{(\text{beraber})} = 749\,925 + 44\,756,39 + 130\,322,98 \simeq 925\,004,37 \text{ TL} \quad (4.99)$$

olarak elde edilir.

Çizelge 4.11: Senaryo 9 için maliyet hesabı özeti.

Bileşen	Normal çakım (TL)	Beraber çakım (TL)
Mobilizasyon	749 925	749 925
Hazırlık (hacim)	44 756,39	44 756,39
Çakma	626 359,78	130 322,98
Toplam	1 421 041,16	925 004,37

4.12 Senaryo 10: Sıkı Kumda 0,40 m (16") Çaplı Ahşap Tekil Kazık Grubu – Maliyet Hesabı

Senaryo 10'da, referans yerleşim korunarak 12 adet tekil içi dolu ahşap kazık kullanılmaktadır. Sıkı kum koşulları için gömülme boyu $L = 8,9$ m olarak alınmıştır. Deniz tabanı üstünde kalan boy $L_{\text{serbest}} = 3,0$ m kabul edilmiştir. Toplam maliyet,

$$C_{\text{top,S10}} = C_{\text{mob}} + C_{\text{haz,S10}} + C_{\text{çak,S10}} \quad (4.100)$$

şeklinde ifade edilmiştir. Burada C_{mob} mobilizasyon, $C_{\text{haz,S10}}$ ahşap kazık hazırlık (hacim), $C_{\text{çak,S10}}$ ise şahmerdan ile çakma maliyetidir (T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı Altyapı Yatırımları Genel Müdürlüğü (AYGM), 2025).

Ahşap kazıklar içi dolu kabul edildiğinden kesit alanı

$$A_{\text{ahşap,S10}} = \frac{\pi}{4} D^2 = \frac{\pi}{4} (0,40)^2 \simeq 0,125 \text{ m}^2 \quad (4.101)$$

olarak bulunur. Toplam imal boyu

$$L_{\text{imal,S10}} = L_{\text{serbest}} + L = 3,0 + 8,9 = 11,9 \text{ m} \quad (4.102)$$

olduğuna göre ($n = 12$) toplam hacim

$$V_{\text{top,S10}} = n A_{\text{ahşap,S10}} L_{\text{imal,S10}} = 12 \times 0,125 \times 11,9 \simeq 17,94 \text{ m}^3 \quad (4.103)$$

olarak elde edilir.

Bu senaryoda birim fiyatlar aşağıdaki şekilde alınmıştır: $C_{\text{mob}} = 749925$ TL ve $c_{\text{haz}} = 6400$ TL/m³ (T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı Altyapı Yatırımları Genel Müdürlüğü (AYGM), 2025). Kesit alanı $A_{\text{ahşap,S10}} \simeq 0,125 \text{ m}^2 \simeq 1256,6 \text{ cm}^2$ olduğundan, çakma birim fiyatı “900 cm²’den büyük” sınıfından $c_{\text{çak}} = 1756,01$ TL/m alınmıştır (T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı Altyapı Yatırımları Genel Müdürlüğü (AYGM), 2025).

Maliyet bileşenleri aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\begin{aligned} C_{\text{haz},S10} &= V_{\text{top},S10} c_{\text{haz}} = 17,944 \times 6400 \simeq 114846,57 \text{ TL}, \\ C_{\text{çak},S10} &= (nL) c_{\text{çak}} = (12 \times 8,9) \times 1756,01 \simeq 187541,87 \text{ TL}. \end{aligned} \quad (4.104)$$

Buna göre toplam maliyet,

$$C_{\text{top},S10} = 749925 + 114846,57 + 187541,87 \simeq 1052313,44 \text{ TL} \quad (4.105)$$

olarak bulunur.

Çizelge 4.12: Senaryo 10 için maliyet hesabı özeti.

Bileşen	İfade	Değer (TL)
Mobilizasyon	C_{mob}	749 925
Hazırlık (hacim)	$C_{\text{haz},S10}$	114 846,57
Çakma	$C_{\text{çak},S10}$	187 541,87
Toplam	$C_{\text{top},S10}$	1 052 313,44

4.13 Senaryo 11: Sıkı Kumda 0,10 m (4") Çaplı Ahşap Mikro-Grup Kazık Düzeni – Maliyet Hesabı

Senaryo 11’de, her bir referans kazık konumunda 7 adet 0,10 m çaplı içi dolu ahşap kazıktan oluşan mikro grup bulunduğundan, bir iskele ayağı altında toplam kazık adedi $n = 12 \times 7 = 84$ ’tür. Sıkı kum koşulları için gömülme boyu $L = 6,7$ m olarak alınmıştır. Deniz tabanı üstünde kalan boy $L_{\text{serbest}} = 3,0$ m kabul edilmiştir. Toplam maliyet,

$$C_{\text{top},S11} = C_{\text{mob}} + C_{\text{haz},S11} + C_{\text{çak},S11} \quad (4.106)$$

şeklinde ifade edilmiştir (T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı Altyapı Yatırımları Genel Müdürlüğü (AYGM), 2025). Ayrıca bu senaryo için “beraber çakım” alternatifi (7 mikro kazığın aynı anda çakılması) ayrı bir alt başlıkta sunulmuştur.

Ahşap kazıklar içi dolu kabul edildiğinden kesit alanı

$$A_{\text{ahşap},S11} = \frac{\pi}{4} D^2 = \frac{\pi}{4} (0,10)^2 \simeq 0,007 \text{ m}^2 \quad (4.107)$$

olarak bulunur. Toplam imal boyu

$$L_{imal,S11} = L_{serbest} + L = 3,0 + 6,7 = 9,7 \text{ m} \quad (4.108)$$

olduğuna göre toplam hacim

$$V_{top,S11} = nA_{ahşap,S11} L_{imal,S11} = 84 \times 0,007 \times 9,7 \simeq 6,399 \text{ m}^3 \quad (4.109)$$

olarak elde edilir.

Bu senaryoda birim fiyatlar aşağıdaki şekilde alınmıştır: $C_{mob} = 749925$ TL ve $c_{haz} = 6400$ TL/m³ (T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı Altyapı Yatırımları Genel Müdürlüğü (AYGM), 2025). Kesit alanı $A_{ahşap,S11} \simeq 0,007 \text{ m}^2 \simeq 78,5 \text{ cm}^2$ olduğundan, çakma birim fiyatı “450 cm²’den küçük” sınıfından $c_{çak} = 981,14$ TL/m alınmıştır (T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı Altyapı Yatırımları Genel Müdürlüğü (AYGM), 2025).

Hazırlık maliyeti,

$$C_{haz,S11} = V_{top,S11} c_{haz} = 6,399 \times 6400 \simeq 40956,32 \text{ TL} \quad (4.110)$$

olarak hesaplanır.

4.13.1 Normal çakım (84 kazık ayrı ayrı)

Normal çakım yaklaşımında toplam çakılan boy

$$L_{çak,top,S11} = nL = 84 \times 6,7 = 562,8 \text{ m} \quad (4.111)$$

olduğundan çakma maliyeti

$$C_{çak,S11}^{(normal)} = L_{çak,top,S11} c_{çak} = 562,8 \times 981,14 \simeq 552185,59 \text{ TL} \quad (4.112)$$

şeklindedir.

Buna göre toplam maliyet $749925 \text{ TL} + 40956,32 \text{ TL} + 552185,59 \text{ TL}$ olarak $1\,343\,066,91 \text{ TL}$ ’dir.

4.13.2 Alternatif: beraber çakım varsayımı (7 mikro kazık aynı anda)

Bu tez kapsamında “beraber çakım” varsayımı, 7 adet mikro kazığın aynı anda çakılması şeklinde tanımlanmıştır. Bu durumda çakım birim fiyatının seçiminde, tek bir mikro kazığın kesit alanı yerine 7 kazığın eşdeğer toplam kesit alanı esas alınmıştır. $d = 0,10$ m için tek bir mikro kazığın kesit alanı $A_1 \simeq 78,5 \text{ cm}^2$ ve eşdeğer kesit alanı $A_{eq} = 7A_1 \simeq 549,5 \text{ cm}^2$ elde edildiğinden, A_{eq} değeri 450–900 cm^2 aralığına karşılık gelmekte, dolayısıyla Çizelge 4.8’te verilen $c_{\text{çak}} = 1428,98 \text{ TL/m}$ birim fiyatı kullanılmıştır.

Eşdeğer çakım adedi $n_2 = n/7 = 12$ alınır. Bu durumda toplam çakılan boy

$$L_{\text{çak,top,S11}}^{(\text{beraber})} = n_2 L = 12 \times 6,7 = 80,4 \text{ m} \quad (4.113)$$

ve çakma maliyeti

$$C_{\text{çak,S11}}^{(\text{beraber})} = L_{\text{çak,top,S11}}^{(\text{beraber})} c_{\text{çak}} = 80,4 \times 1428,98 = 114890,00 \text{ TL} \quad (4.114)$$

olarak elde edilir. Hazırlık ve mobilizasyon maliyetleri değişmediğinden toplam maliyet

$$C_{\text{top,S11}}^{(\text{beraber})} = 749925 + 40956,32 + 114890,00 \simeq 905771,32 \text{ TL} \quad (4.115)$$

şeklinde bulunur.

Çizelge 4.13: Senaryo 11 için maliyet hesabı özeti.

Bileşen	Normal çakım (TL)	Beraber çakım (TL)
Mobilizasyon	749 925	749 925
Hazırlık (hacim)	40 956,32	40 956,32
Çakma	552 185,59	114 890,00
Toplam	1 343 066,91	905 771,32

5. SENARYO KARŞILAŞTIRMASI VE DEĞERLENDİRME

Bu bölümde, Bölüm 4 kapsamında hesaplanan Senaryo 0–11 toplam maliyetleri toplu olarak karşılaştırılmış, maliyet sürücüleri (mobilizasyon, imalat/hazırlık, çakma) üzerinden değerlendirme yapılmıştır. Mikro-grup senaryoları için ayrıca “normal çakım” ve “beraber çakım” varsayımları bir duyarlılık çerçevesi olarak ele alınmıştır. Ahşap mikro-grup senaryolarında (S7, S9 ve S11) beraber çakım alternatifinde, çakım birim fiyatı seçimi eşdeğer kesit alanı yaklaşımıyla güncellenmiştir.

5.1 Maliyet Analizi Özeti

Çizelge 5.1 normal çakım sonuçlarını ve mikro-grup senaryolarında varsa beraber çakım alternatifini birlikte sunmaktadır. Mikro-grup senaryolarında C_{top}^* , beraber çakım varsayımı altındaki toplam maliyeti, tekil kazık senaryolarında ise normal çakım sonucunu temsil etmektedir. Referans senaryo maliyeti S0 alınmış ve oranlar C_{top}^*/S_{ref} biçiminde raporlanmıştır.

Çizelge 5.1: S0–S11 için toplam maliyetlerin toplu özeti.

Senaryo	C_{top} (normal) [TL]	C_{top} (beraber) [TL]	C_{top}^* [TL]	C_{top}^*/S_{ref} [-]
S0	1 736 372,10	–	1 736 372,10	1,000
S1	2 206 565,02	1 968 609,63	1 968 609,63	1,133
S2	1 627 188,99	–	1 627 188,99	0,937
S3	2 044 032,26	1 840 517,78	1 840 517,78	1,060
S4	1 533 604,28	–	1 533 604,28	0,883
S5	1 911 050,92	1 735 715,37	1 735 715,37	1,000
S6	1 138 338,00	–	1 138 338,00	0,656
S7	1 533 670,64	952 785,44	952 785,44	0,549
S8	1 086 108,84	–	1 086 108,84	0,626
S9	1 421 041,16	925 004,37	925 004,37	0,533
S10	1 052 313,44	–	1 052 313,44	0,606
S11	1 343 066,91	905 771,32	905 771,32	0,522

Çizelge 5.1’e göre, normal çakım varsayımı altında en düşük toplam maliyet S10 senaryosunda elde edilmiştir ($C_{top,S10} \simeq 1\,052\,313$ TL). Bunu S8 ve S6 takip

etmektedir. Beraber çakım varsayımı devreye alındığında ise en düşük C_{top}^* değeri S11 senaryosunda oluşmaktadır ($C_{top,S11}^* \simeq 905\,771$ TL).

Çizelge 5.2: C_{top}^* değerine göre en düşük maliyetli senaryoların sıralaması.

Sıra	Senaryo	C_{top}^* [TL]
1	S11	905 771,32
2	S9	925 004,37
3	S7	952 785,44
4	S10	1 052 313,44
5	S8	1 086 108,84

5.2 Normal Çakım Sonuçlarının Değerlendirilmesi

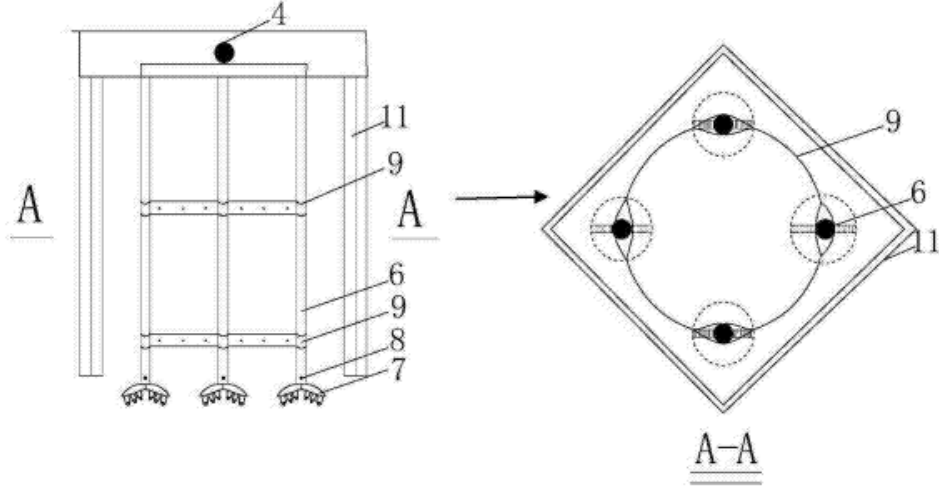
Normal çakım altında en düşük maliyetli senaryoların (S10, S8, S6) ortak özelliği, tekil kazık düzeniyle daha sınırlı toplam çakım metrajına sahip olmalarıdır. Bu durumda mobilizasyon tüm senaryolar için sabit bir maliyet sürücüsü iken, çakma maliyeti toplam metrajla birlikte artmakta ve özellikle mikro-grup senaryolarında toplam bütçede daha belirgin bir pay oluşturmaktadır.

Çelik mikro-grup senaryolarında (S1, S3, S5) normal çakım altında toplam maliyetlerin yükseldiği görülmektedir. Bu artışın ana nedeni, toplam çakılan boyun nL ifadesi ile hızla büyümesi ve çakma maliyetinin toplam maliyet içinde belirgin bir pay almasıdır.

5.3 Beraber Çakım Varsayımının Etkisi ve Birim Fiyat Seçimi

Mikro grup senaryolarında kullanılan beraber çakım varsayımı, aynı imalat çevrimi içinde birden fazla elemanın koordineli biçimde çalıştırılabildiği saha organizasyonlarını temsil etmektedir. Literatürde ve uygulama odaklı dokümanlarda, çoklu başlıklı sistemlerle birden fazla delgi ve karıştırma elemanının aynı anda çalıştırılmasına dayanan düzenekler yer almaktadır. Örneğin CN105239566A numaralı patentte, konumlandırma elemanı ve bağlama düzeni ile birden fazla sondaj elemanının aynı çevrimde eş zamanlı çalıştırılabildiği bir sistem tarif edilmektedir (Kong, Zhou, Liu, Zhou, & Cao, 2016). Bu tür bir sistemin şematik görünümü ve kesit detayı Şekil 5.1 içinde verilmiştir. Patent kapsamındaki imalat yöntemi bu tezdeki çakım süreci ile bire bir aynı değildir. Bununla birlikte aynı eksen etrafında çoklu elemanın birlikte

konumlandırılması ve eş zamanlı işletilmesi fikri, beraber çakım varsayımının saha organizasyonu açısından uygulanabilir bir karşılığı olduğunu göstermesi bakımından önemlidir.



Şekil 5.1: Çoklu başlıklı imalat düzeninin şematik görünümü ve A A kesiti. Şekil, birden fazla sondaj elemanının aynı merkez etrafında konumlandırılarak birlikte çalıştırılabildiği bir düzeni göstermektedir (Kong, Zhou, Liu, Zhou, & Cao, 2016).

Bu tezde beraber çakım varsayımı, 7 adet mikro kazığın aynı anda çakılması şeklinde modellenmiş ve bu nedenle çakım metrajı n yerine $n/7$ üzerinden temsil edilmiştir. Ahşap mikro grup senaryolarında (S7, S9 ve S11) beraber çakım için çakım birim fiyatı seçimi, 7 mikro kazığın eşdeğer toplam kesit alanı üzerinden yapılmıştır.

Dairesel kesitli tek bir mikro kazık için

$$A_1 = \frac{\pi d^2}{4} \quad (5.1)$$

ve beraber çakım altında eşdeğer kesit alanı

$$A_{eq} = 7A_1 \quad (5.2)$$

olarak tanımlanmıştır. $d = 0,10$ m için $A_1 \simeq 78,5$ cm² ve $A_{eq} \simeq 549,5$ cm² elde edilmektedir. Bu durumda beraber çakımda çakım birim fiyatı, 450 cm² ile 900 cm² aralığına karşılık gelen kalem üzerinden alınmıştır (Bkz. Çizelge 4.8).

Bu tanım altında, ahşap mikro gruplarda çakma maliyeti indirgeme oranı

$$\frac{C_{\text{çak}}^{(\text{beraber})}}{C_{\text{çak}}^{(\text{normal})}} = \frac{(n/7)Lc_{450 \leq A \leq 900}}{nLc_{A \leq 450}} = \frac{1}{7} \frac{1428,98}{981,14} \simeq 0,208 \quad (5.3)$$

şeklinde bulunmuştur. Buna göre çakma maliyetinde yaklaşık %79 mertebesinde bir azalma oluşmaktadır. Toplam maliyetteki azalma ise mobilizasyon ve hazırlık bileşenleri sabit kaldığı için daha sınırlı seviyede gerçekleşmektedir. Çizelge 5.3 mikro grup senaryolarında beraber çakımın toplam maliyete etkisini özetlemektedir.

Çizelge 5.3: Mikro grup senaryolarında beraber çakım varsayımının toplam maliyete etkisi.

Senaryo	C_{top} normal (TL)	C_{top} beraber (TL)	Tasarruf (TL)	Tasarruf (%)
S1	2 206 565,02	1 968 609,63	237 955,39	10,78
S3	2 044 032,26	1 840 517,78	203 514,48	9,96
S5	1 911 050,92	1 735 715,37	175 335,55	9,17
S7	1 533 670,64	952 785,44	580 885,20	37,88
S9	1 421 041,16	925 004,37	496 036,79	34,91
S11	1 343 066,91	905 771,32	437 295,59	32,56

Çizelge 5.3 sonuçları, çelik mikro gruplarda toplam tasarrufun sınırlı kalabildiğini göstermektedir. Bunun temel nedeni mobilizasyon ve imalat maliyetlerinin toplam bütçe içinde yüksek paya sahip olmasıdır. Ahşap mikro gruplarda ise çakma maliyetinin normal çakım altında daha yüksek paya sahip olması, beraber çakım varsayımının toplam maliyeti anlamlı ölçekte düşürmesine imkân tanımaktadır. Bununla birlikte ahşap mikro gruplar için beraber çakımda birim fiyat seçiminin eşdeğer kesit alanına göre üst aralıktan yapılması, tasarruf büyüklüğünü sınırlayan bir modelleme unsurudur.

Çizelge 5.4: Ahşap mikro grup senaryolarında maliyet bileşenlerinin toplam içindeki payı.

Senaryo	Normal çakım (pay, %)			Beraber çakım (pay, %)		
	Mobilizasyon	Hazırlık	Çakma	Mobilizasyon	Hazırlık	Çakma
S7	48,89	3,28	47,83	78,70	5,27	16,02
S9	52,78	3,15	44,07	81,07	4,84	14,09
S11	55,82	3,05	41,12	82,79	4,52	12,69

Çizelge 5.4 birlikte değerlendirildiğinde, beraber çakım altında ahşap mikro grup senaryolarında mobilizasyon maliyetinin toplam içindeki payının %79 ile %83

seviyelerine çıktığı görülmektedir. Bu durum küçük ölçekli tek iskele veya tek ayak uygulamalarında mobilizasyonun baskın maliyet bileşeni olduğunu, dolayısıyla beraber çakım gibi organizasyonel kararların toplam maliyet üzerindeki etkisinin mobilizasyon büyüklüğüne bağlı kaldığını göstermektedir.

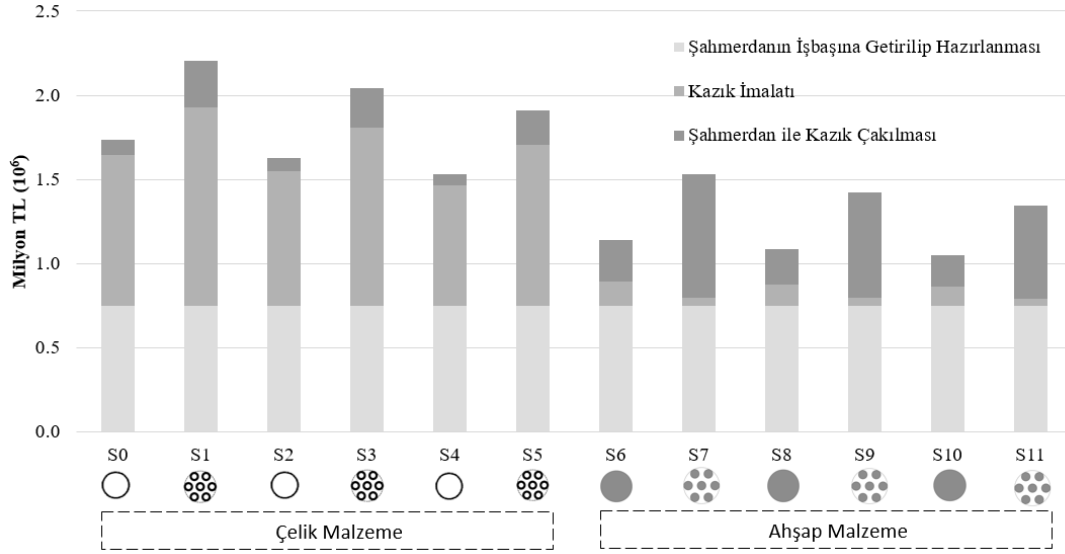
5.4 Maliyet Analizi Yorumlaması

Bu çalışma kapsamında maliyet sonuçları iki katmanlı okunmalıdır. İlk katmanda normal çakım varsayımı altında elde edilen sonuçlar esas alınır. Şekil 5.2 incelendiğinde toplam maliyetin tüm senaryolarda mobilizasyon kalemi tarafından belirli bir taban seviyeye taşındığı görülür. Bu durumda senaryolar arasındaki ayrışma ağırlıklı olarak kazık imalatı ve kazık çakılması bileşenlerinden kaynaklanır. Normal çakım koşulunda tekil ahşap kazık senaryoları, özellikle S10 ve S8, toplam maliyet açısından daha avantajlı bir konumda yer almaktadır. Bu bulgu, ekipman veya saha organizasyonu nedeniyle kazıkların tek tek çakıldığı şantiyeler için pratik bir karar işareti sunmaktadır.

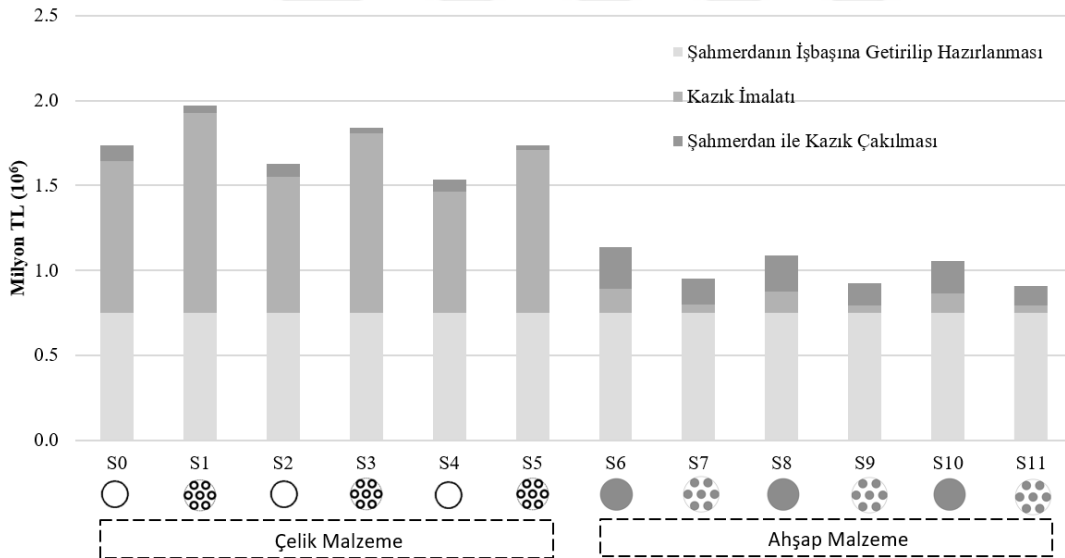
İkinci katmanda beraber çakımın sahada uygulanabilir olduğu kabul edilir. Mikro grup senaryolarında aynı anda çoklu kazık çakımının mümkün olmasına dair uygulama örneklerinin bulunması, bu varsayımın literatürde karşılığının olduğunu göstermektedir (Kong, Zhou, Liu, Zhou, & Cao, 2016). Bu kabul altında, Şekil 5.3 mikro grup senaryolarında çakma maliyetinin azaldığını ve toplam maliyet sıralamasının anlamlı biçimde değişebildiğini göstermektedir. Ahşap mikro grup senaryoları S11, S9 ve S7 bu çerçevede daha düşük toplam maliyet seviyelerine inmektedir. En düşük C_{top}^* değeri S11 senaryosunda elde edilmekte, S9 ve S7 onu takip etmektedir (Bkz. Çizelge 5.2).

Bu değerlendirme, mobilizasyon maliyetinin proje ölçeği ile birlikte yeniden okunması gerektiğini de işaret eder. Bölüm 4 kapsamında sabit alınan mobilizasyon kalemi, ayak sayısı veya iskele sayısı arttıkça birim ayağa düşen etkisini azaltır. Bu durumda senaryolar arası farklar daha çok hazırlık ve imalat ile çakma bileşenlerinden izlenir. Dolayısıyla bu tezde sunulan sıralamalar, tek uygulama ölçeğinde ilk yapım maliyetine dayalı karar desteği sağlamaktadır. Proje ölçeği büyüdüğünde mobilizasyonun

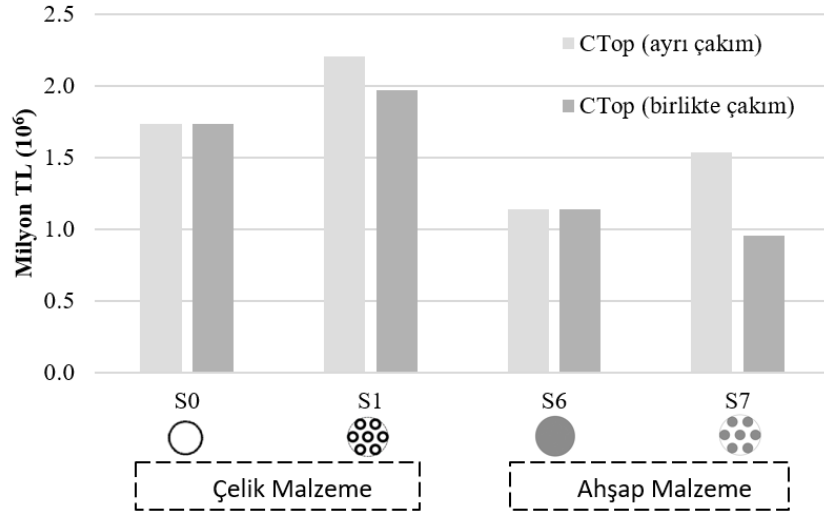
normalize edildiği bir okumayla sıralamaların yeniden değerlendirilmesi uygun olacaktır.



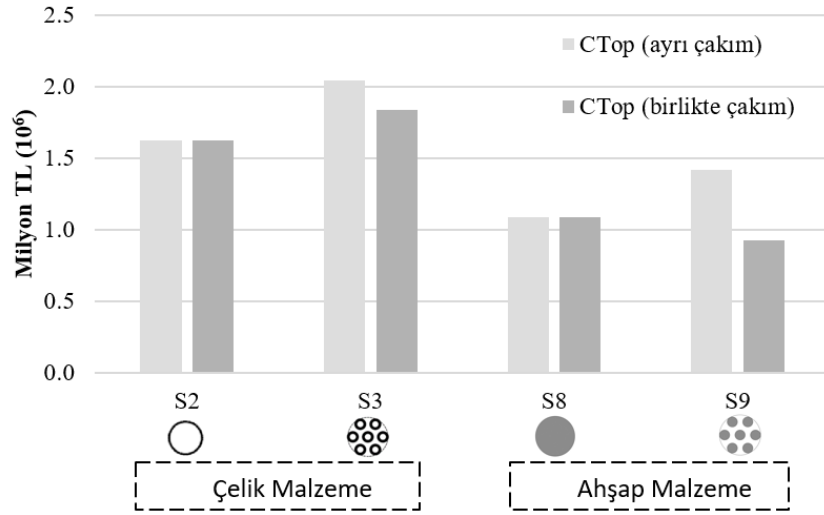
Şekil 5.2: Senaryolara göre maliyet bileşenleri özeti (Normal çakım varsayımı).



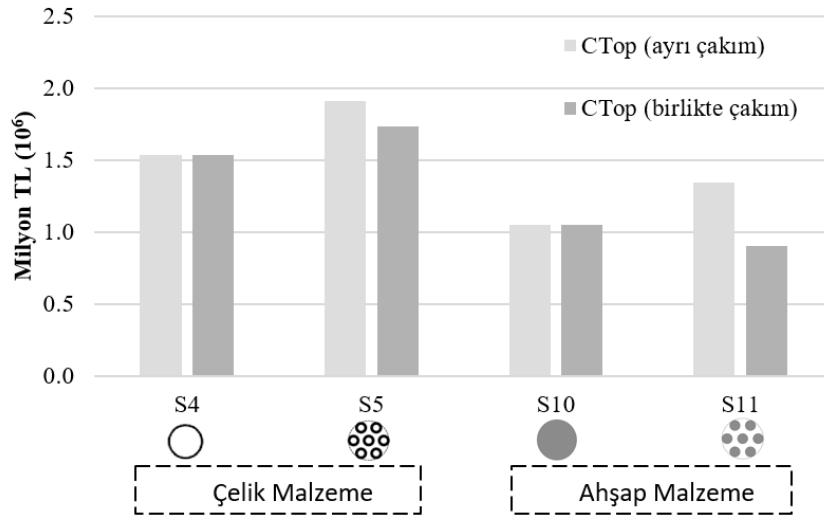
Şekil 5.3: Senaryolara göre maliyet bileşenleri özeti (Birlikte çakım varsayımı).



Şekil 5.4: Gevşek kum zemin koşulu için toplam maliyet karşılaştırması.



Şekil 5.5: Orta sıkı kum zemin koşulu için toplam maliyet karşılaştırması



Şekil 5.6: Sıkı kum zemin koşulu için toplam maliyet karşılaştırması.

Şekil 5.4, Şekil 5.5 ve Şekil 5.6 birlikte değerlendirildiğinde, tekil kazık senaryolarında ayrı çakım ve birlikte çakım sonuçlarının aynı seviyede kaldığı görülmektedir. Bunun nedeni bu tezde birlikte çakım varsayımının yalnızca mikro grup senaryoları için tanımlanmış olmasıdır. Mikro grup senaryolarında ise birlikte çakım varsayımı ile çakma metrajının düşmesi, toplam maliyeti aşağı çekmektedir. Etkinin büyüklüğü malzeme grubuna ve maliyet bileşenlerinin toplam içindeki payına bağlıdır. Ahşap mikro grup senaryolarında çakma maliyetinin payı daha yüksek olduğundan birlikte çakımın etkisi daha belirgin hale gelmektedir. Çelik mikro grup senaryolarında mobilizasyon ve imalat maliyetleri toplam içinde daha baskın kalabildiği için birlikte çakımın toplam maliyet üzerindeki etkisi daha sınırlı düzeyde izlenmektedir.



6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, rekreatif amaçlı kazıklı bir iskelenin kohezyonsuz zeminlerde kum ortamında düşey taşıma gücü temelli güvenli tasarımı için tekil kazık ve çoklu mikro kazık grubu alternatifleri senaryo yaklaşımı ile değerlendirilmiştir. Çalışmada sürekli değişkenli bir optimizasyon algoritması kurulmamış, bunun yerine önceden tanımlanan ayırık senaryoların S0 ile S11 arasındaki kümede aynı düşey tasarım talebini Q_{all} sağlayıp sağlamadığı kontrol edilmiştir. Uygun bulunan senaryolar AYGM birim fiyat sistemi esas alınarak maliyetlendirilmiş, uygun seçenekler arasından en düşük toplam maliyete sahip alternatifler belirlenmiştir.

Her senaryo için mobilizasyon, hazırlık ve imalat, çakma maliyetleri ayrı ayrı hesaplanmıştır. Mikro grup senaryolarında saha organizasyonuna duyarlılığı temsil etmek amacıyla normal çakım ve beraber çakım varsayımları ayrı ayrı ele alınmıştır. Çelik boru kazıkların maliyet hesabında et kalınlığı 10 mm sabit kabul edilmiştir.

Toplu karşılaştırmalar, normal çakım varsayımı altında en düşük toplam maliyetin tekil ahşap kazık düzenine sahip senaryolarda elde edildiğini göstermektedir. Mobilizasyon kalemi tüm senaryolarda sabit bir taban maliyet oluşturmakta, senaryolar arası farklar ağırlıklı olarak hazırlık ve imalat ile çakma maliyeti bileşenlerinden kaynaklanmaktadır. Normal çakım altında öne çıkan senaryolar ve toplam maliyet değerleri Çizelge 6.3 içinde verilmiştir. Bu değerlendirmeye göre normal çakım perspektifinde en düşük maliyetli üç senaryo S10, S8 ve S6 olarak belirlenmiştir. Bu sonuç, beraber çakımın uygulanamadığı veya kazıkların tek tek çakıldığı şantiye koşulları için karar desteği niteliği taşımaktadır.

Mikro grup senaryolarında beraber çakım varsayımı dikkate alındığında maliyet sıralamasının belirgin biçimde değiştiği görülmektedir. Bu tezde beraber çakım, yedi adet mikro kazığın aynı anda çakılması olarak tanımlanmış ve çakım metrajı $n/7$ temsili ile modellenmiştir. Ahşap mikro grup senaryolarında çakım birim fiyatının seçimi tek bir mikro kazığın kesit alanına göre değil, yedi kazığın eşdeğer toplam

Çizelge 6.1: Maliyet düşürmeye yönelik uygulanabilir önerilerin özeti.

Öneri	Bu tezdeki karşılığı ve beklenen etkisi
Beraber çakım organizasyonu	Mikro grup senaryolarında çakım metrajı n yerine $n/7$ temsili ile azaltılır ve çakma maliyeti düşer. Ahşap mikro gruplarda toplam maliyette belirgin azalma oluşur. Çizelge 6.2.
Birim fiyat eşiği yönetimi	Ahşap mikro gruplarda eşdeğer kesit alanının daha düşük aralıkta tutulması birim fiyat bandını aşağı çekebilir. Bu amaçla çap ve grup adedi tasarım değişkeni olarak yönetilmelidir. Eşitlik 6.2.
Mikro kazık adedinin azaltılması	Yedili grup yerine daha düşük adetli düzenler eşdeğer kesit alanını azaltarak birim fiyat bandında avantaj yaratabilir. Taşıma gücü ve grup verimliliği birlikte kontrol edilmelidir.
Mobilizasyonun ölçek etkisi	Tek uygulama yerine çoklu ayak ve iskele ölçeğinde mobilizasyonun birim maliyeti azalır. Bu durumda beraber çakım ve grup düzeni seçiminin göreceli etkisi daha görünür hale gelir.

kesit alanına göre yapılmaktadır. Bu yaklaşım birim fiyatın daha üst kesit aralığından seçilmesine neden olabilmektedir. Buna karşın metraj indirimi nedeniyle çakma maliyetinde belirgin bir azalma oluşmaktadır. Net etki, Çizelge 6.2 içinde görüldüğü üzere toplam maliyette kayda değer tasarruf olarak ortaya çıkmaktadır.

Çizelge 6.2: Mikro grup senaryolarında beraber çakım varsayımının toplam maliyete etkisi.

Senaryo	C_{top} normal (TL)	C_{top} beraber (TL)	Tasarruf (TL)	Tasarruf (%)
S1	2 206 565,02	1 968 609,63	237 955,39	10,78
S3	2 044 032,26	1 840 517,78	203 514,48	9,96
S5	1 911 050,92	1 735 715,37	175 335,55	9,17
S7	1 533 670,64	952 785,44	580 885,20	37,88
S9	1 421 041,16	925 004,37	496 036,79	34,91
S11	1 343 066,91	905 771,32	437 295,59	32,56

Elde edilen bulgular, kararın yalnızca tekil kazık mı yoksa grup mu sorusuna indirgenemeyeceğini göstermektedir. Şantiye organizasyonu, çakım yöntemi ve birim fiyat temsili toplam maliyet üzerinde belirleyici olmaktadır. Özellikle küçük ölçekli tek uygulamalarda mobilizasyon kaleminin toplam maliyete baskın katkısı nedeniyle, beraber çakımın nihai etkisi belirli bir düzeyin üzerinde mobilizasyon büyüklüğü tarafından sınırlanabilmektedir. Buna rağmen ahşap mikro gruplarda normal çakım altında çakma maliyeti toplam içinde yüksek pay aldığı için beraber çakım etkisi daha

görünür hale gelmiştir. Bu koşullarda maliyet açısından en uygun seçeneklerin beraber çakım altında mikro grup senaryolarına kaydığı görülmüştür. Çizelge 6.3.

Yağcı, Yıldırım, Çelik, Kitsikoudis, Duran, and Kırca (2017) çalışması, çoklu eleman dizilerinin grup davranışı nedeniyle tekil elemanlara kıyasla farklı performans karakteristikleri sergileyebileceğini ve kıyı ortamlarında akım, yapı ve taban etkileşimi kapsamında oyulma gibi lokal zemin kayıplarının tasarımda kritik bir rol oynadığını ortaya koymaktadır. Bu tezde oyulma derinliği doğrudan hesaplanmamış veya modellenmemiştir. Bununla birlikte çoklu kazık grubunun sağladığı yedeklilik ve yükün birden fazla elemana yayılması ilkesi, oyulma benzeri lokal etkilerin bulunduğu koşullarda daha yönetilebilir bir davranış potansiyeli oluşturabilir. Bu nedenle, beraber çakımın uygulanabilir olduğu ve maliyetlendirmede eşdeğer kesit alanı yaklaşımının tutarlı biçimde temsil edilebildiği durumlarda, çoklu kazık grubunun performans tarafındaki olası avantajının maliyet tarafında da rekabetçi kalabildiği değerlendirilmiştir.

Maliyeti düşürmeye yönelik uygulama önerileri iki ana ekseninde toplanmaktadır. Birinci eksen, beraber çakımın erken aşamada planlanmasıdır. Mikro grup senaryolarında beraber çakım, çakma metrajını doğrudan azaltan bir strateji olduğundan, şantiye lojistiği, platform erişimi, iş akışı ve ekipman seçimi bu hedefi destekleyecek şekilde kurgulanmalıdır. İkinci eksen, ahşap kazıklarda kesit alanına bağlı birim fiyat eşiklerinin tasarım parametresi olarak yönetilmesidir. Ahşap mikro gruplarda yedi kazığın eşdeğer kesit alanı

$$A_{eq} = 7 \frac{\pi d^2}{4} \quad (6.1)$$

ile ifade edilmektedir. $A_{eq} \leq 450 \text{ cm}^2$ koşulunu sağlayacak çap üst sınırı yaklaşık olarak

$$d \leq \sqrt{\frac{4 \cdot 450}{7\pi}} \simeq 9,05 \text{ cm} \quad (6.2)$$

şeklinde elde edilmiştir. Bu bulgu, uygun taşıma gücünün sağlanabildiği durumlarda ahşap mikro grup tasarımının eşdeğer kesit alanını daha düşük birim fiyat

aralığında tutacak şekilde yeniden kurgulanmasının toplam maliyeti azaltabileceğini göstermektedir. Ayrıca mikro kazık adedinin yedi yerine daha düşük seçilmesi de eşdeğer kesit alanını azaltarak birim fiyat açısından avantaj oluşturabilir. Bu durumda grup verimliliği, gerekli kazık boyu ve toplam maliyet birlikte değerlendirilmelidir.

Mobilizasyon bileşeninin ölçek etkisi karar sürecinde ayrıca dikkate alınmalıdır. Tek uygulama ölçeğinde mobilizasyonun payı yüksek olduğundan, aynı kazık sistemi daha büyük proje ölçeklerinde daha avantajlı hale gelebilir. Birden fazla ayak veya birden fazla iskele için mobilizasyon maliyeti birim uygulamaya dağıtıldığında, beraber çakım gibi operasyonel kararların toplam maliyet üzerindeki etkisi daha açık biçimde ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle kararların yalnızca tek uygulama toplam maliyeti üzerinden değil, proje ölçeğini temsil eden karşılaştırmalarla da desteklenmesi önerilmektedir.

İleriki çalışmalar için geliştirme alanları, senaryo yaklaşımının daha performans temelli ve daha geniş bir tasarım uzayına taşınmasına yöneliktir. Kohezyonlu zeminler için aynı senaryo çerçevesinin genişletilmesi, yatay yüklerin p-y eğrileri veya daha gelişmiş zemin ve yapı etkileşimi modelleri ile birlikte değerlendirilmesi, oyulma etkisinin sayısal veya deneysel yöntemlerle modellenerek çoklu kazık gruplarının performans avantajının nicel hale getirilmesi bu kapsamda öncelikli başlıklar olarak değerlendirilmektedir. Ayrıca bu çalışmada yedili mikro grup düzeni merkezde tutulmuştur. Daha az kazık içeren grup düzenlerinin denenmesi ve bu senaryolarda grup verimliliği, eşdeğer kesit alanı eşiği ve maliyet bileşenleri arasındaki dengenin sistematik biçimde incelenmesi daha düşük toplam maliyetli çözümler üretebilir. Son olarak yalnızca ilk yapım maliyetinin değil, bakım ve onarım gereksinimi, dayanıklılık, bozunma, korozyon ve gömülü karbon gibi sürdürülebilirlik göstergelerinin maliyet çerçevesine dahil edilmesi, karar sürecini uzun dönemli performans ve çevresel etki açısından daha bütüncül bir zemine taşıyacaktır.

Bu tezde maliyet kalemleri AYGM birim fiyat sistemi üzerinden mobilizasyon, hazırlık ve çakma bileşenleri ile temsil edildi. Ancak pratikte taşıma, istifleme, saha içi elleçleme ve geçici depolama gibi lojistik süreçler özellikle küçük ölçekli işlerde toplam maliyetin hissedilir bir kısmını oluşturabiliyor. Küçük çaplı ve daha kısa

boy lu kazıklar, kamyon başına daha fazla adet taşınabilmesi, istifleme alanı ihtiyacının azalması ve vinç kapasitesi ile saha içi manevra gereksinimlerinin düşmesi nedeniyle lojistik açıdan avantaj sağlayabilir. Bu nedenle ileriki çalışmalarda, kazık çapı ve boyuna bağlı lojistik maliyet katsayıları tanımlanarak toplam maliyet çerçevesine eklenmesi ve tekil kazık ile mikro grup alternatiflerinin yalnızca birim fiyat kalemleri üzerinden değil, tedarik ve şantiye operasyon maliyetleri ile birlikte değerlendirilmesi önerilmektedir.

Çizelge 6.3: Normal çakım ve beraber çakım perspektiflerinde öne çıkan senaryoların toplam maliyet özeti.

Perspektif	Senaryo	Toplam maliyet (TL)	Değerlendirme notu
Normal çakım	S10	1 052 313,44	Tekil ahşap düzen. Toplam çakım metrajının düşük olması nedeniyle avantajlıdır.
Normal çakım	S8	1 086 108,84	Tekil ahşap düzen. Mobilizasyon sabitken çakma maliyeti sınırlı kalmaktadır.
Normal çakım	S6	1 138 338,00	Tekil düzen. Toplam maliyet düşük seviyededir.
Beraber çakım mikro grup	S11	905 771,32	Ahşap mikro grup düzen. Beraber çakım altında en düşük toplam maliyettir.
Beraber çakım mikro grup	S9	925 004,37	Ahşap mikro grup düzen. Beraber çakım altında ikinci en düşük maliyettir.
Beraber çakım mikro grup	S7	952 785,44	Ahşap mikro grup düzen. Beraber çakım altında üçüncü en düşük maliyettir.



KAYNAKLAR

- Abd Elaziz, A., & El Nagggar, M. H.** (2014). Group behaviour of hollow-bar micropiles in cohesive soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 51(12), 1362–1375. <https://doi.org/10.1139/cgj-2014-0148>
- Abushama, M., et al.** (2025). Optimisation of embodied carbon and construction cost of concrete, steel and timber piles. *Developments in the Built Environment*, 22, 100656. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2025.100656>
- Akbay Arama, Z., Kayabekir, A. E., Bekdaş, G., & Geem, Z. W.** (2020). Co₂ and cost optimization of reinforced concrete cantilever soldier piles: A parametric study with harmony search algorithm. *Sustainability*, 12(15), 5906. <https://doi.org/10.3390/su12155906>
- American Petroleum Institute.** (2014). *Api rp 2a-wsd: Planning, designing, and constructing fixed offshore platforms—working stress design* (22nd ed.). American Petroleum Institute.
- ASCE/COPRI.** (2014). *Seismic design of piers and wharves*. American Society of Civil Engineers.
- Ateş, M., & Şadoğlu, E.** (2023). Estimation of group efficiency of driven pile groups in sandy soil considering pile geometry and embedment depth. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 27, 5123–5134. <https://doi.org/10.1007/s12205-023-0444-9>
- Bank, L. C.** (2006). *Composites for construction: Structural design with frp materials*. John Wiley & Sons.
- Broms, B. B.** (1981). *Precast piling practice*. Thomas Telford.
- Chen, X., Liu, Y., Zhang, L., et al.** (2021). Cost optimization of pile foundations using an improved particle swarm algorithm. *Structural Engineering and Mechanics*, 77(3), 305–320. <https://doi.org/10.12989/sem.2021.77.3.305>
- Coduto, D. P.** (2001). *Foundation design: Principles and practices* (2nd ed.). Prentice Hall.
- Das, B. M.** (2010). *Principles of foundation engineering* (7th ed.). Cengage Learning.
- DNV GL AS.** (2017). *Dnvgl-rp-c212: Offshore soil mechanics and geotechnical engineering* [Recommended Practice]. DNV GL.

- Elgabaly, A., et al.** (2025). Case study of soil-structure interaction of fully loaded container rafts at dekheila port in alexandria, egypt. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 12, 295–314. <https://doi.org/10.1007/s40515-025-00742-1>
- Fam, A., Greene, R., & Rizkalla, S. H.** (2003). Field applications of concrete-filled frp tubes for marine piles. In *Field applications of frp reinforcement: Case studies* (pp. 161–180, Vol. SP-215). American Concrete Institute.
- Fındık, M., Çelik, İ. D., Keskin, S. N., & Öztürk, Y.** (2020). Dalga yükü altında iskele tipi yapılarda kullanılan çakma çelik kazık sistemlerin davranışı. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 35(2), 295–309.
- Ghassemi, A., et al.** (2025). The effect of micropile reinforcement on the seismic response of liquefiable soil: Shaking table tests. *Soils and Foundations*, 65, 102505. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2025.102505>
- Jelušić, P.** (2024). Enhancing sustainability of building foundations with efficient open-end pile optimization. *Sustainability*, 16(16), 6880. <https://doi.org/10.3390/su16166880>
- Komurka, V. L.** (2015). Foundation support cost: A practical approach to pile design. *IFCEE 2015: International Foundations Congress and Equipment Expo*.
- Kong, G., Zhou, Y., Liu, H., Zhou, H., & Cao, Z.** (2016, January 13). *Multi-head stirring type large-diameter cast-in-situ pipe pile device and application thereof* (Patent application No. CN105239566A) [Patent in Chinese. Application number CN201510494526.4]. CN. <https://patents.google.com/patent/CN105239566A/en>
- Korkmaz, S.** (2012). *Düşey ve/veya eğik kazıklı iskele yapılarında zemin-yapı etkileşimi* [Yüksek Lisans Tezi]. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Kumbasar, V., & Kip, F.** (1999). *Zemin mekaniği problemleri*. Çağlayan Kitabevi.
- Letsios, C., Lagaros, N. D., & Papadrakakis, M.** (2014). Optimum design methodologies for pile foundations in london. *Case Studies in Structural Engineering*, 2, 24–32. <https://doi.org/10.1016/j.csse.2014.08.001>
- Leung, C. F., Chow, Y. K., & Shen, R. F.** (2010). Behavior of pile groups and pile rafts in clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136(11), 1464–1472. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000353](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000353)
- Li, S., Aghazadeh, D., & Langlois, M.** (2025). An investigation on the lateral load-sharing among piles in a pile group with various pile cap configurations. *Buildings*, 15, 1431. <https://doi.org/10.3390/buildings15071431>

- Melchers, R. E.** (2003). Modeling of marine immersion corrosion for mild and low-alloy steels—part 1: Phenomenological model. *Corrosion*, 59(4), 319–334. <https://doi.org/10.5006/1.3277564>
- Pirrello, C., & Poulos, H. G.** (2014). Assessment of pile group settlement using interaction factors. *Computers and Geotechnics*, 59, 12–21. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2014.02.006>
- Poulos, H. G.** (2017). *Tall building foundation design*. CRC Press.
- Poulos, H. G., & Davis, E. H.** (1980). *Pile foundation analysis and design*. John Wiley & Sons.
- Randolph, M. F.** (2003). Science and empiricism in pile foundation design. *Géotechnique*, 53(10), 847–875. <https://doi.org/10.1680/geot.53.10.847.37518>
- T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı.** (2025). İnşaat birim fiyatlarına esas işçilik, araç ve gereç rayiç listeleri.
- T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı Altyapı Yatırımları Genel Müdürlüğü.** (2016). Kıyı yapıları planlama ve tasarım teknik esasları [Resmi teknik esas dokümanı].
- T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı Altyapı Yatırımları Genel Müdürlüğü (AYGM).** (2025). *Birim fiyatlar* [Kıyı Yapıları Yapım Dairesi Başkanlığı yayını]. Retrieved December 12, 2025, from <https://aygm.uab.gov.tr/birim-fiyatlar>
- Tomlinson, M. J., & Woodward, J.** (1994). *Pile design and construction practice* (4th ed.). E & FN Spon.
- USACE.** (2002). *Coastal engineering manual* [Engineer Manual, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Coastal and Hydraulics Laboratory].
- Wang, X., Li, Y., Zhang, J., et al.** (2023). Seismic behavior of pile-supported wharf structures subjected to near-fault ground motions [Tam künyesi daha sonra güncellenecektir]. *Dergi adı güncellenecektir*.
- Yağcı, O., Yıldırım, I., Çelik, M. F., Kitsikoudis, V., Duran, Z., & Kırca, V. S. Ö.** (2017). Clear water scour around a finite array of cylinders. *Applied Ocean Research*, 68, 114–129. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2017.08.014>
- Zhong, R., Chen, P., Zhou, X., Li, H., Zong, S., Dou, L., Liu, T., & Wen, M.** (2025). Mechanical behaviour and bearing capacity of hybrid steel-concrete and timber-concrete composite piles under vertical load. *Applied Sciences*, 15, 5868. <https://doi.org/10.3390/app15105868>



ÖZGEÇMİŞ

Adı SOYADI: Mehmet Yusuf ERBİŞİM

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans:** 2021, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

MESLEKİ DENEYİMLER VE ÖDÜLLER:

- 2021–Günümüz: HEC Mühendislik & Danışmanlık, İnşaat Mühendisi.

TEZ ÇALIŞMASINDAN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Erbişim, M. Y. & Karadoğan, Ü. (2026).** Farklı Zemin Tiplerinde Kazıklı İskele Temelleri İçin Tekil Kazığa Alternatif Olarak Kullanılan Kazık Gruplarının Maliyet Analizi. *ALKÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 1, 61–74. (Makale)

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- Aksel, M., **Erbişim, M. Y.**, Yorgun, F. B., Yağcı, O. ve Çokgör, Ş. Guide system between floating pier and pile having springs. Patent numarası: WO2024172801A1. (Patent)
- Heidari, N., Aksel, M., Yağcı, O., **Erbişim, M. Y.**, Çokgör, Ş. & Valyrakis, M. (2025). Morphodynamic Controls on Thermal Plume Dispersion at River Mouths: Insights from Field Data and Numerical Modeling. *Water*, 17(18), 2721. (Makale)
- Aksel, M., Yorgun, F. B., **Erbişim, M. Y.**, Çokgör, Ş. ve Yağcı, O. (2022). Termal Deşarjın Kıyı Bölgesinde Seyrelme Sürecinin Nümerik Modelleme Yöntemiyle İncelenmesi. *Türkiye İnşaat Mühendisliği 18. Teknik Kongre ve Sergisi*, 7–9 Kasım 2022, İstanbul. (Bildiri)

